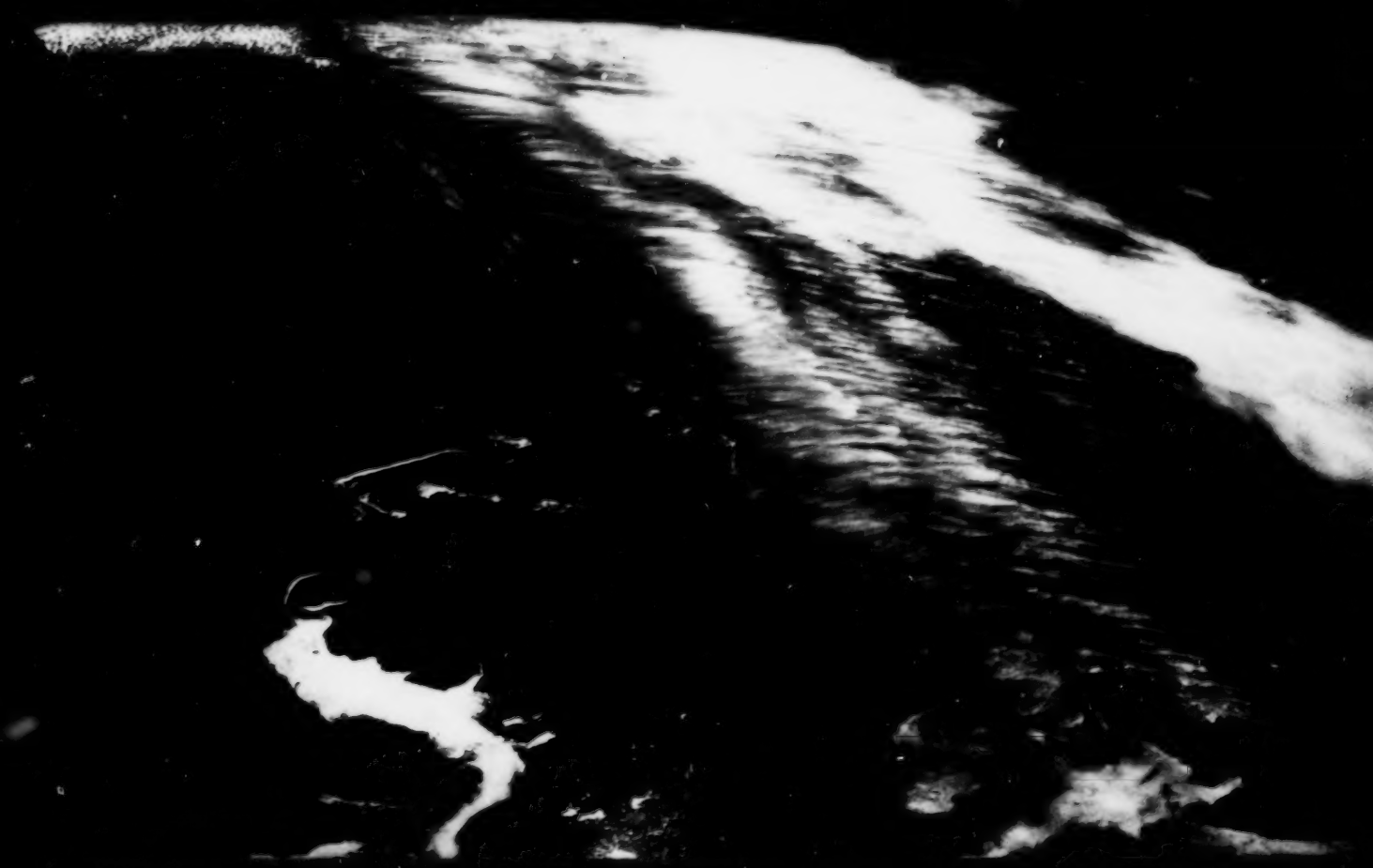
Environnement Canada Environment Canada

Une introduction au changement climatique

UNE PERSPECTIVE CANADIENNE



Canada

Le présent rapport est disponible en format électronique sur le site Web à l'adresse
www.msc.ec.gc.ca/education/scienceofclimatechange/index_f.html

Pour obtenir gratuitement des copies papier, prière de s'adresser par écrit à :

Direction de l'évaluation de la science et de l'intégration
Environnement Canada
4905, rue Dufferin
Downsview (Ontario)
M3H 5T4

(416) 739-4432

Publié avec l'autorisation du ministre de l'Environnement

©Ministre des Travaux publics et des Services gouvernementaux
Canada 2005

La conception graphique, les illustrations et la production technique ont été assurées par
BTT Communications (Toronto)

ISBN #: 0-662-74823-9
N° de catalogue : En56-205/2005-1F
Octobre 2005

Also available in English.

Imprimé sur papier recyclable

Une introduction au changement climatique

UNE PERSPECTIVE CANADIENNE

HENRY HENGEVELD
BOB WHITEWOOD
ANGUS FERGUSSON

ENVIRONNEMENT CANADA

Remerciements

Le rapport **UNE INTRODUCTION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE** a été rédigé par Henry Hengeveld (Scientifique émérite, Direction de l'évaluation et de l'intégration scientifiques), Bob Whitewood (Direction de la recherche climatologique), et Angus Fergusson (Direction de l'évaluation et de l'intégration scientifiques). Une contribution a été fournie par Morrie Paul (Bureau des changements climatiques) et Mark Berman (Affaires Liées aux changements climatiques).

Une grande partie des éléments présentés ici ont été initialement publiés en 1990 (avec mise à jour en 1995) sous la forme d'un Rapport sur l'état de l'environnement intitulé *Comprendre l'atmosphère en évolution*. L'exactitude du contenu de *Une Introduction au changement climatique* a été validée par les experts suivants : Elizabeth Bush, Rob Cross, Kaz Higuchi, Lucy Vincent, Bin Yu, Xuebin Zhang et Francis Zwiers (tous du Environnement Canada); Dominique Blain (Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada); Pam Kertland (RNCan) et Allyn Clarke (Institut océanographique de Bedford, Pêches et Océans Canada). Les auteurs tiennent à les remercier de leur précieuse collaboration.

Table des matières

INTRODUCTION ____ iii

CHAPITRE 1 LE CLIMAT NATUREL DE LA TERRE ____ 1

Le système climatique naturel de la Terre ____ 1

Le moteur thermique de la planète ____ 1

Le rayonnement solaire incident ____ 2

Le rayonnement thermique sortant ____ 3

L'équilibre du climat ____ 4

Les climats du passé ____ 5

La reconstruction du climat ____ 5

Le dernier million d'années ____ 7

Les 2000 dernières années ____ 9

Les 100 dernières années ____ 9

CHAPITRE 2 L'AMPLIFICATION DE L'EFFET DE SERRE ____ 13

Le dioxyde de carbone ____ 13

Le méthane ____ 17

Les autres gaz à effet de serre ____ 18

Les autres influences humaines ____ 19

CHAPITRE 3 PRÉVOIR LE CLIMAT ____ 21

Les modèles mathématiques du climat ____ 21

Les modélisations pour l'avenir ____ 23

L'homme est-il responsable du réchauffement de la Terre? ____ 26

CHAPITRE 4 UNE PLANÈTRE PLUS CHAUDE ____ 29

Les écosystèmes terrestres naturels ____ 29

Les écosystèmes agricoles ____ 30

Les régions côtières ____ 31

Les autres impacts ____ 33

Les implications pour la sécurité mondiale ____ 33

CHAPITRE 5 UN CANADA PLUS CHAUD 35

Les forêts 35

L'agriculture 37

Les ressources en eau 38

Les pêches 39

Les zones côtières 40

Les transports 41

La santé et le bien-être des populations humaines 42

La production et l'utilisation de l'énergie 43

La sécurité mondiale 43

CHAPITRE 6 COMMENT RÉAGISSONS-NOUS? 45

Une meilleure compréhension du changement climatique 45

L'effort mondial de recherche 45

L'évaluation et la diffusion de la science du changement climatique 46

L'étude des liens avec d'autres questions atmosphériques 47

Vers un consensus sur la nécessité d'agir 48

La réaction planétaire en matière de politiques 48

La réaction du Canada 49

Le rôle des citoyens 51

Introduction

À CE QUE NOUS SAVONS, l'atmosphère de la Terre est la seule à pouvoir assurer la vie. Elle fournit en effet l'oxygène, la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone nécessaires pour entretenir les processus biologiques dans l'écosystème de la surface de la planète. Elle comporte aussi dans ses niveaux supérieurs une couche d'ozone protectrice qui fait écran contre le rayonnement ultraviolet nocif provenant du Soleil. De plus, parmi ses composants figurent des gaz qui agissent comme une couverture isolante autour de la planète, et gardent les températures en surface dans une plage assurant la présence d'eau liquide et donc de vie telle que nous la connaissons. Chacun de ces facteurs est essentiel à l'existence des êtres vivants, et tous persistent depuis des millions d'années.

Les scientifiques reconnaissent depuis longtemps l'importance de l'atmosphère de la Terre, mais ce n'est qu'à la fin des années 1960 qu'on nous a présenté les premières et bouleversantes images de la Terre vue de l'espace. On y voyait une remarquable oasis de bleu et de blanc, dans l'immensité d'un cosmos sans vie – une oasis protégée par une mince et fragile couche de gaz. C'était là un rappel saisissant du fait que la Terre est peut-être véritablement unique et irremplaçable. Divers astronautes des vols Apollo ont fait remarquer que, quand on la regarde depuis la Lune, l'atmosphère de la Terre est si mince qu'elle est virtuellement impossible à observer; c'est donc une ressource que l'homme doit apprendre à conserver et à utiliser judicieusement.

Si ces observations sur l'atmosphère de la Terre étaient pertinentes il y a 40 ans, elles le sont encore plus maintenant. On a en effet des indications scientifiques de plus en plus claires que l'atmosphère de la Terre subit des changements majeurs, qui ont à certains égards déjà dépassé les limites de ses fluctuations naturelles des 100 000 dernières années au moins, et qui, selon les projections, devraient devenir significativement plus prononcés avec le temps. Ces changements semblent directement liés non pas à des forces externes qui s'exerceraient sur la planète, mais à une expérience géophysique d'échelle planétaire mise en marche par l'humanité, une expérience incontrôlée qui pourrait modifier l'écosystème terrestre bien au-delà de ce que la Terre a connu depuis plusieurs centaines de milliers d'années.

Cette expérience est le résultat de deux facteurs, un progrès technologique fulgurant et une explosion démographique sans précédent, qui ont tous deux débuté au XVIII^{e} siècle. Le progrès technologique, en utilisant de nouvelles formes d'énergie et en multipliant la capacité de production, a considérablement accru l'impact de l'homme sur l'environnement, non seulement parce qu'il consomme davantage de ressources, mais aussi parce qu'il génère d'énormes quantités de produits et sous-produits nocifs pour l'environnement. La croissance de la population mondiale, qui est passée d'environ 600 millions de personne au début du XVIII^{e} siècle à quelque 6,5 milliards à l'heure actuelle, s'est superposée à ces effets, avec le résultat que les activités humaines se déroulent maintenant à une échelle telle que leur influence sur l'environnement rivalise avec celle des forces de la nature.

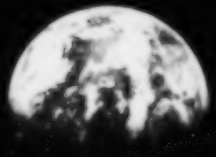
Ces phénomènes s'accompagnent de changements rapides de l'utilisation des terres, d'une augmentation de l'industrialisation et d'une insatiable soif d'énergie. Certaines conséquences de ces développements, comme le smog, la pollution de l'eau et l'appauvrissement et la contamination des sols, sont déjà douloureusement visibles aux échelles locale et régionale, et ont

fait l'objet dans de nombreux pays d'une vigoureuse législation antipollution. À l'échelle planétaire, par contre, les effets en ont été beaucoup plus subtils, parce que les dommages sont causés par le rejet « hors nature » dans l'atmosphère de gaz qui sont pour la plupart inodores et invisibles, dont les effets ne sont pas immédiatement perceptibles. Ce n'est que récemment que nous avons pris conscience que la présence de ces gaz peut modifier la composition de l'atmosphère. Et, comme l'atmosphère est le système le plus essentiel au maintien de la vie sur la Terre, ces changements auront inévitablement des incidences majeures sur la biosphère.

Les changements de la composition de l'atmosphère qui prennent place à l'heure actuelle soulèvent deux inquiétudes planétaires fondamentales. L'une concerne l'appauvrissement graduel de la couche d'ozone protectrice de la haute atmosphère. L'autre est le réchauffement de la surface et de la basse atmosphère de la Terre. C'est sur cette dernière que porte le présent rapport, qui vise à résumer la compréhension scientifique actuelle des processus en jeu dans le changement climatique et des implications de ce dernier pour l'écosystème planétaire, pour la communauté mondiale et pour le Canada.

Les chapitres 1 à 4 du rapport résument la compréhension scientifique actuelle du changement climatique et de ses impacts planétaires. Les données qui y sont présentées sont tirées surtout des rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (et en particulier du Troisième Rapport d'évaluation, paru en 2001) et d'articles scientifiques clés publiés ces dernières années dans des revues à comité de lecture. Les rapports du Groupe d'experts constituent les évaluations les plus récentes et les plus exhaustives du sujet réalisées par la communauté scientifique internationale.

Pour le chapitre 5, qui présente les nombreux impacts possibles d'un réchauffement du climat sur le Canada, une grande partie de l'information est tirée d'évaluations nationales à ce sujet. En conclusion, le chapitre 6 examine ce qui doit être fait et ce qui fait pour réagir à cet important problème.



CHAPITRE 1

Le climat naturel de la Terre

Ce sont les gaz composant l'atmosphère qui assurent les conditions essentielles à la vie sur la Terre. Mais c'est le climat qui façonne les conditions propices à la vie et contribue à en définir les limites. Le climat régit les cycles biologiques des végétaux et des animaux, influe sur leur croissance et leur vitalité, et constitue un facteur déterminant de leur répartition sur la planète. La grande majorité des formes de vie complexes se sont adaptées pour vivre dans une niche climatique précise et souvent assez étroite.

En s'appuyant entre autres sur la technologie, l'homme a réussi à étendre sa niche pour y inclure à peu près toutes les régions du globe. La vie humaine reste cependant étroitement tributaire des facteurs climatiques, et les divers types d'établissements, d'abris, de vêtements, d'agriculture, de modes de transport et même de culture témoignent de l'influence pénétrante du climat.

On définit généralement le climat comme les conditions météorologiques moyennes. Le climat d'un endroit donné est donc la moyenne, sur un certain nombre d'années, des variations quotidiennes de la température, des précipitations, de la nébulosité, du vent et d'autres paramètres atmosphériques qui y règnent normalement. Mais le climat n'est pas seulement la somme de ces valeurs moyennes; il se définit aussi par la variabilité d'éléments individuels, comme la température ou les précipitations, et par la fréquence à laquelle se manifestent divers types de conditions météorologiques. En fait, tous les facteurs caractéristiques des régimes météorologiques d'un endroit donné font partie de son climat.

Bien que la notion même de climat présuppose une continuité et une stabilité à long terme de ces régimes, le climat demeure un phénomène variable. Les changements peuvent être faibles ou de relativement courte durée, comme un hiver anormalement froid ou un été très chaud. Ou bien, comme les grands âges glaciaires dont la durée se chiffre en milliers d'années, ils peuvent se produire à l'échelle de l'immensité géologique.

Nous nous attacherons ici aux changements auxquels on peut s'attendre pour les quelques décennies et siècles à venir, puisque c'est sur ce relativement court laps de temps que les premiers grands effets du réchauffement planétaire dû aux activités humaines se feront probablement sentir. Pour bien comprendre à quoi sont dus ces changements, il nous faudra aussi étendre la période considérée et examiner les nombreux changements climatiques du passé. C'est ainsi que nous pourrons mieux comprendre la variabilité naturelle du climat de la Terre et des processus en jeu dans ses oscillations souvent spectaculaires. Auparavant, il nous faut cependant examiner les forces physiques qui régissent le flux de l'énergie dans l'atmosphère, puisque ce sont elles qui déterminent les caractéristiques maîtresses du climat de notre planète.

LE SYSTÈME CLIMATIQUE NATUREL DE LA TERRE

Le moteur thermique de la planète

On peut, très simplement, considérer le système climatique de la Terre comme une gigantesque machine thermique, alimentée par l'énergie de courte longueur d'onde arrivant du Soleil. À mesure que l'énergie solaire y entre, elle réchauffe la Terre et l'air qui l'entoure, mettant en mouvement les courants atmosphériques et océaniques, et régissant les processus d'évaporation et de précipitations du cycle hydrologique. Ces mouvements et processus donnent naissance aux conditions météorologiques et donc au climat.

Toute l'énergie qui pénètre dans le système climatique finit par en sortir, retournant à l'espace sous la forme de rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde. Tant que l'énergie qui sort du système équivaut à celle qui y entre, notre moteur thermique atmosphérique reste en équilibre, et la température moyenne de la Terre demeure relativement constante. Par contre, si la quantité d'énergie entrante (ou sortante) change, l'équilibre va se rompre et les températures de la planète vont changer jusqu'à ce que le système s'ajuste et trouve un nouvel équilibre.

Le flux de l'énergie dans le système est régi par la présence de certains gaz et particules dans l'atmosphère. Toutefois, aussi surprenant que cela puisse paraître, les constituants majoritaires de l'atmosphère n'interviennent que peu, voire pas, dans ce processus. Bien que l'atmosphère sèche soit composée à 99 % de molécules d'azote et d'oxygène (tableau 1), ces gaz sont relativement transparents au rayonnement et ont peu d'effet sur l'énergie qui les traverse. C'est le reste de l'atmosphère, avec la vapeur d'eau et les nuages, qui joue le plus grand rôle en régulant les flux énergétiques déterminants des processus climatiques. Cette fraction de 1 % se compose de divers gaz et particules qui réfléchissent, absorbent et réemettent des quantités significatives tant de rayonnement solaire entrant que d'énergie thermique sortante.

TABLEAU 1

Concentration de divers gaz dans l'air sec (en pourcentage du volume total)

Azote	78,08	Hélium	0,0005
Oxygène	20,95	Méthane	0,00017
Argon	0,93	Hydrogène	0,00005
Dioxyde de carbone	0,03	Hémioxyde d'azote	0,00003
Néon	0,0018	Ozone	Variable

Source : CRC Handbook of Chemistry and Physics, 52e édition.

Le rayonnement solaire incident

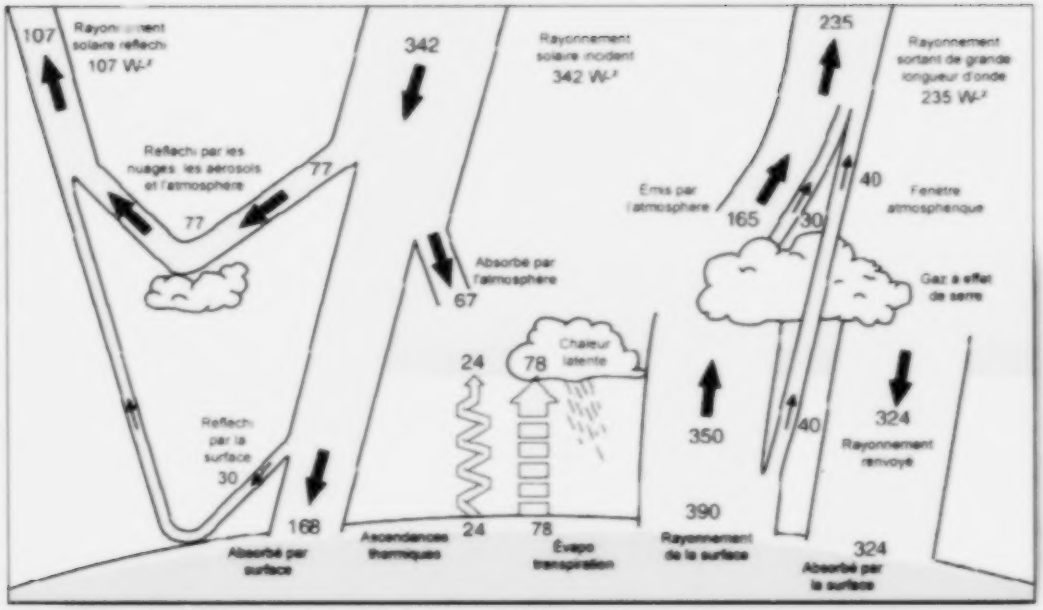
Moyennée sur la planète, la quantité de rayonnement solaire qui entre dans l'atmosphère est d'environ 342 watts par mètre carré (W/m^2). Cependant, environ 107 W/m^2 (31 %) de cette énergie incidente de courte longueur d'onde est réfléchie vers l'espace par l'atmosphère et la surface de la Terre. Les 235 W/m^2 restants (environ 69 %) sont absorbés dans l'atmosphère et par la surface de la Terre : c'est le combustible qui alimente le système climatique planétaire.

Le côté gauche de la figure 1.1 montre comment cette énergie incidente est réfléchie et absorbée par l'atmosphère et la surface. Les processus en jeu sont les suivants :

■ *Réflexion par l'atmosphère et la surface de la Terre* – Les nuages et les aérosols présents dans l'atmosphère réfléchissent et diffusent vers l'espace une fraction significative du rayonnement solaire incident. Les aérosols sont de fines particules et gouttelettes qui restent assez longtemps en suspension dans l'atmosphère ; parmi les aérosols très réfléchissants figurent les minuscules gouttelettes d'acide sulfurique rejetées lors des éruptions volcaniques, les sulfates issus des feux de surface et des procédés industriels, le sel des embruns marins et les poussières. La quantité de rayonnement de courte longueur d'onde renvoyée vers l'espace par les nuages

FIGURE 1.1

Flux de l'énergie dans le système climatique planétaire



Source : Kiehl et Trenberth, 1997.

Le flux de l'énergie dans le système est régi par la présence de certains gaz et particules dans l'atmosphère. Toutefois, aussi surprenant que cela puisse paraître, les constituants majoritaires de l'atmosphère n'interviennent que peu, voire pas, dans ce processus. Bien que l'atmosphère sèche soit composée à 99 % de molécules d'azote et d'oxygène (tableau 1), ces gaz sont relativement transparents au rayonnement et ont peu d'effet sur l'énergie qui les traverse. C'est le reste de l'atmosphère, avec la vapeur d'eau et les nuages, qui joue le plus grand rôle en régulant les flux énergétiques déterminants des processus climatiques. Cette fraction de 1 % se compose de divers gaz et particules qui réfléchissent, absorbent et réémettent des quantités significatives tant de rayonnement solaire entrant que d'énergie thermique sortante.

TABLEAU 1

Concentration de divers gaz dans l'air sec (en pourcentage du volume total)

Azote	78,08	Hélium	0,0005
Oxygène	20,95	Méthane	0,00017
Argon	0,93	Hydrogène	0,00005
Dioxyde de carbone	0,03	Hémioxyde d'azote	0,00003
Néon	0,0018	Ozone	Variable

Source : CRC Handbook of Chemistry and Physics, 82e édition.

Le rayonnement solaire incident

Moyennée sur la planète, la quantité de rayonnement solaire qui entre dans l'atmosphère est d'environ 342 watts par mètre carré (W/m^2). Cependant, environ 107 W/m^2 (31 %) de cette énergie incidente de courte longueur d'onde est réfléchie vers l'espace par l'atmosphère et la surface de la Terre. Les 235 W/m^2 restants (environ 69 %) sont absorbés dans l'atmosphère et par la surface de la Terre; c'est le combustible qui alimente le système climatique planétaire.

Le côté gauche de la figure 1.1 montre comment cette énergie incidente est réfléchie et absorbée par l'atmosphère et la surface. Les processus en jeu sont les suivants :

■ ***Réflexion par l'atmosphère et la surface de la Terre*** – Les nuages et les aérosols présents dans l'atmosphère réfléchissent et diffusent vers l'espace une fraction significative du rayonnement solaire incident. Les aérosols sont de fines particules et gouttelettes qui restent assez longtemps en suspension dans l'atmosphère; parmi les aérosols très réfléchissants figurent les minuscules gouttelettes d'acide sulfurique rejetées lors des éruptions volcaniques, les sulfates issus des feux de surface et des procédés industriels, le sel des embruns marins et les poussières. La quantité de rayonnement de courte longueur d'onde renvoyée vers l'espace par les nuages

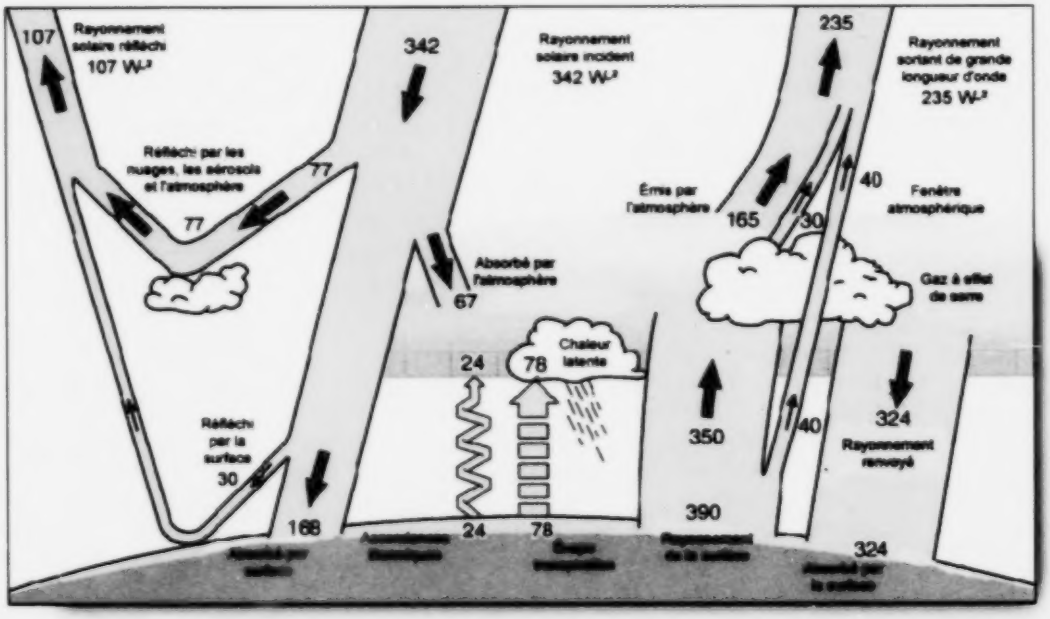


FIGURE 1.1

Flux de l'énergie dans le système climatique planétaire

Source : Kiehl et Trenberth, 1997.

et les aérosols varie considérablement d'un moment et d'un endroit à l'autre. Par exemple, les grandes éruptions volcaniques peuvent injecter brutalement dans la stratosphère d'importantes quantités d'aérosols sulfatés qui y restent plusieurs années avant de se redéposer sous l'influence de la gravité. Par ailleurs, la présence d'aérosols sulfatés anthropiques dans la basse atmosphère des régions industrialisées peut y réduire significativement la réflexion du rayonnement solaire incident par rapport aux régions moins polluées de la planète. Cependant, les données d'observation indiquent que, en moyenne, les nuages et les aérosols reflètent actuellement environ 77 W/m^2 (22,5 %) du rayonnement incident vers l'espace.

La surface de la Terre renvoie elle aussi vers l'espace une fraction significative du rayonnement solaire incident. Comme dans le cas de l'atmosphère, la quantité de rayonnement réfléchi dépend de la saison et de l'endroit. Par exemple, la neige et la glace, qui recouvrent une grande partie de la surface de la Terre aux latitudes moyennes à élevées pendant l'hiver, sont très réfléchissantes; par contre, la surface des océans libres de glace et les sols nus sont de mauvais réflecteurs. En fin de compte, si on en fait la moyenne dans le temps et dans l'espace, la surface de la Terre renvoie vers l'espace près de 30 W/m^2 (presque 9 %) du rayonnement solaire qui entre dans l'atmosphère. Au total, l'atmosphère et la surface de la Terre renvoient vers l'espace quelque (31 %) du rayonnement solaire incident, sans qu'il intervienne dans le système climatique.

■ ***Absorption dans l'atmosphère*** – En plus de réfléchir et de diffuser le rayonnement solaire, l'atmosphère absorbe près de 67 W/m^2 (20 %) de cette énergie. Environ les deux tiers de cette absorption est imputable à la vapeur d'eau. Le deuxième élément qui absorbe le rayonnement solaire est la couche d'ozone de la stratosphère, qui absorbe une grande partie de la plage ultraviolette de l'énergie solaire incidente. Ainsi, la couche d'ozone non seulement protège l'écosystème terrestre contre les effets nocifs de ce rayonnement, mais aussi conserve une partie de l'énergie solaire dans la haute atmosphère. Environ un dixième de l'absorption peut être attribuée aux nuages. Enfin, une petite fraction de l'absorption est due à d'autres gaz et à des aérosols (surtout les aérosols foncés, comme la suie).

Le rayonnement thermique sortant

L'atmosphère et la surface de la Terre, réchauffées par les rayons du Soleil, renvoient ensuite toute cette énergie vers l'espace en émettant du rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde. Lorsque le système climatique est en équilibre, la quantité totale d'énergie qu'il retourne dans l'espace doit en moyenne être égale à la quantité de rayonnement solaire incident absorbé – soit 235 W/m^2. Le rayonnement infrarouge renvoyé vers l'espace rencontre plusieurs grands obstacles, surtout des nuages et des gaz absorbants. Le côté droit de la figure 1 illustre les processus en jeu à ce stade :

■ ***Nuages*** – En plus de réfléchir le rayonnement solaire incident, les nuages absorbent une grande partie du rayonnement thermique sortant. L'énergie ainsi absorbée est réémise, en grande partie vers la surface. C'est pourquoi, à proximité de la surface de la Terre, l'air nocturne est généralement plus chaud par temps nuageux que par temps clair. Les fractions relatives de rayonnement qui sont absorbées et réfléchies varient selon la quantité, l'épaisseur et le type des nuages en présence.

■ ***Gaz absorbants*** – Un certain nombre de gaz mineurs naturellement présents dans l'atmosphère, dont la plupart sont relativement transparents au rayonnement solaire incident, absorbent la plus grande partie de l'énergie thermique infrarouge renvoyée par la Terre vers l'espace. L'énergie ainsi absorbée est ensuite réémise dans toutes les directions, une partie vers la surface et une partie vers le haut, où d'autres molécules absorbantes présentes à des niveaux plus élevés de l'atmosphère peuvent l'absorber à leur tour. À terme, les molécules absorbantes du sommet de l'atmosphère émettent l'énergie directement vers l'espace. Ces gaz rendent donc l'atmosphère opaque au rayonnement thermique sortant, un peu de la même manière qu'un verre opaque affecte la transmission de la lumière visible. Avec les nuages, ils forment une couche isolante autour de la Terre, et maintiennent celle-ci chaude. Comme les serres conservent la chaleur de façon un peu semblable, le phénomène a été appelé *effet de serre*, et les gaz absorbants qui le causent sont dits *gaz à effet de serre*. Parmi les importants gaz à effet de serre naturellement présents figurent la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'ozone et l'hémioxyde d'azote.

Il est relativement facile d'estimer l'ordre de grandeur de l'effet de serre naturel. En théorie, la température moyenne en surface requise pour émettre 235 W/m^2 vers l'espace est seulement de –19 °C. Nous savons cependant que la température moyenne à la surface de la Terre est plutôt de l'ordre de +14 °C, soit 33 °C

de plus. Ce réchauffement supplémentaire, dû à l'effet de serre, est suffisant pour faire d'une planète comme la Lune, où la vie n'est pas possible, une planète comme la Terre, où elle l'est.

L'ÉQUILIBRE DU CLIMAT

Le climat est à terme régi par la façon dont l'atmosphère et les océans redistribuent l'énergie thermique que la Terre a absorbée du Soleil. Comme l'intensité du rayonnement solaire varie avec la latitude, l'heure et la saison, toutes les parties de la planète ne sont pas réchauffées également. L'effet de réchauffement est le plus marqué sous les tropiques, où l'énergie reçue du Soleil est plus grande que l'énergie retournée dans l'espace (figure 1.2). Les températures y sont donc beaucoup plus élevées que la moyenne planétaire, se situant toujours à quelques degrés de 30 °C. À l'opposé, les régions polaires connaissent une perte nette d'énergie vers l'espace et les températures y varient de maximums de près de 20 °C pendant l'été polaire de l'hémisphère Nord à un minimum de –60 °C pendant l'hiver polaire de l'hémisphère Sud.

C'est cette importante différence de température entre les tropiques et les pôles qui est le déclencheur principal des courants atmosphériques et océaniques de la Terre. Essentiellement, ceux-ci transportent l'air et l'eau chauds de l'équateur vers les pôles pendant que l'air et l'eau froids se déplacent en sens inverse. Cette circulation est cependant modifiée par la rotation de la Terre autour de son axe et par les effets des masses terrestres et du relief, qui créent un jeu complexe de circulations des masses d'air et des eaux océaniques sur la verticale et sur l'horizontale.

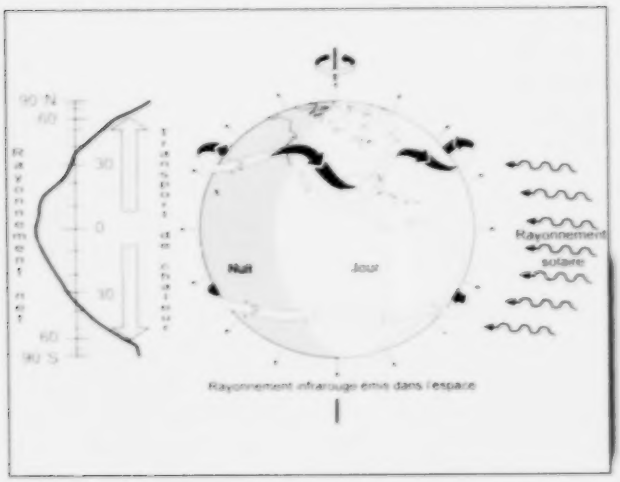
Une grande partie de l'énergie solaire absorbée à la surface de la Terre a pour effet de faire évaporer l'eau des surfaces terrestres et océaniques et de la végétation. Plus il y a de chaleur en surface et plus la température de l'air est élevée, plus grande est la quantité de vapeur d'eau qui peut s'évaporer et être conservée dans l'atmosphère. Cependant, une fois que l'air devient saturé de vapeur d'eau, celle-ci se condense de nouveau en minuscules gouttelettes d'eau ou cristaux de glace, qui forment des nuages. Dans les bonnes conditions, ces gouttelettes ou cristaux retombent au sol sous la forme de précipitations. Où, quand, en quelle quantité et sous quelle forme dépendra des caractéristiques de divers paramètres locaux en surface et dans l'atmosphère. De plus, comme l'humidité de l'atmosphère est aussi transportée sur l'horizontale par les courants aériens, les régimes de précipitations qui se dessinent sur la Terre sont eux aussi régis par les grandes configurations de la circulation atmosphérique planétaire. C'est pourquoi la distribution des précipitations sur le globe est encore plus complexe que celle de la température de l'atmosphère (figure 1.3). Certaines régions reçoivent d'énormes surplus de pluie qui alimentent de riches écosystèmes luxuriants, alors que d'autres n'en reçoivent pas assez pour nourrir la végétation et deviennent des déserts.

De nombreux autres facteurs exercent aussi une influence sur le climat de la Terre. En plus de la circulation de l'air, des courants océaniques et des propriétés de la surface qui régissent les processus d'évaporation, on doit également prendre en compte les effets des nuages et des grandes masses de neige et de glace, l'influence du relief et l'impact des processus et activités en jeu dans la biosphère, auxquels viennent s'ajouter les variations du réchauffement solaire, non seulement d'une région à l'autre, mais aussi d'une saison à l'autre et entre le jour et la nuit.

Tous ces paramètres sont des éléments interreliés et interagissants du système climatique (figure 1.4). Si un de ces éléments change et perturbe l'équilibre du système, il va probablement s'ensuivre des réactions complexes de certains autres, voire de tous, à mesure que le système s'ajustera pour atteindre un nouvel équilibre. Certaines réactions peuvent survenir très rapidement, et d'autres extrêmement lentement. Qui plus est, certaines peuvent accentuer le changement initial

FIGURE 1.2

Déséquilibre thermique annuel net selon la latitude



Source : GTI – DRE du GIEC, 1995.

de plus. Ce réchauffement supplémentaire, dû à l'effet de serre, est suffisant pour faire d'une planète comme la Lune, où la vie n'est pas possible, une planète comme la Terre, où elle l'est.

L'ÉQUILIBRE DU CLIMAT

Le climat est à terme régi par la façon dont l'atmosphère et les océans redistribuent l'énergie thermique que la Terre a absorbée du Soleil. Comme l'intensité du rayonnement solaire varie avec la latitude, l'heure et la saison, toutes les parties de la planète ne sont pas réchauffées également. L'effet de réchauffement est le plus marqué sous les tropiques, où l'énergie reçue du Soleil est plus grande que l'énergie retournée dans l'espace (figure 1.2). Les températures y sont donc beaucoup plus élevées que la moyenne planétaire, se situant toujours à quelques degrés de 30 °C. À l'opposé, les régions polaires connaissent une perte nette d'énergie vers l'espace et les températures y varient de maximums de près de 20 °C pendant l'été polaire de l'hémisphère Nord à un minimum de –60 °C pendant l'hiver polaire de l'hémisphère Sud.

C'est cette importante différence de température entre les tropiques et les pôles qui est le d lencheur principal des courants atmosphériques et océaniques de la Terre. Essentiellement, ceux-ci transportent l'air et l'eau chauds de l'équateur vers les pôles pendant que l'air et l'eau froids se déplacent en sens inverse. Cette circulation est cependant modifiée par la rotation de la Terre autour de son axe et par les effets des masses terrestres et du relief, qui créent un jeu complexe de circulations des masses d'air et des eaux océaniques sur la verticale et sur l'horizontale.

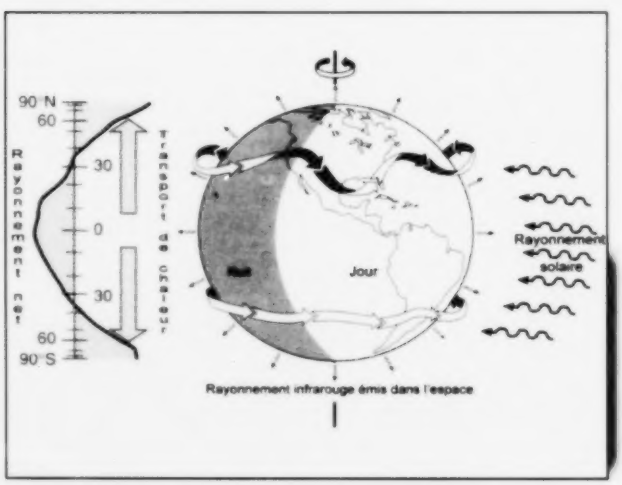
Une grande partie de l'énergie solaire absorbée à la surface de la Terre a pour effet de faire évaporer l'eau des surfaces terrestres et océaniques et de la végétation. Plus il y a de chaleur en surface et plus la température de l'air est élevée, plus grande est la quantité de vapeur d'eau qui peut s'évaporer et être conservée dans l'atmosphère. Cependant, une fois que l'air devient saturé de vapeur d'eau, celle-ci se condense de nouveau en minuscules gouttelettes d'eau ou cristaux de glace, qui forment des nuages. Dans les bonnes conditions, ces gouttelettes ou cristaux retombent au sol sous la forme de précipitations. Où, quand, en quelle quantité et sous quelle forme dépendra des caractéristiques de divers paramètres locaux en surface et dans l'atmosphère. De plus, comme l'humidité de l'atmosphère est aussi transportée sur l'horizontale par les courants aériens, les régimes de précipitations qui se dessinent sur la Terre sont eux aussi régis par les grandes configurations de la circulation atmosphérique planétaire. C'est pourquoi la distribution des précipitations sur le globe est encore plus complexe que celle de la température de l'atmosphère (figure 1.3). Certaines régions reçoivent d'énormes surplus de pluie qui alimentent de riches écosystèmes luxuriants, alors que d'autres n'en reçoivent pas assez pour nourrir la végétation et deviennent des déserts.

De nombreux autres facteurs exercent aussi une influence sur le climat de la Terre. En plus de la circulation de l'air, des courants océaniques et des propriétés de la surface qui régissent les processus d'évaporation, on doit également prendre en compte les effets des nuages et des grandes masses de neige et de glace, l'influence du relief et l'impact des processus et activités en jeu dans la biosphère, auxquels viennent s'ajouter les variations du réchauffement solaire, non seulement d'une région à l'autre, mais aussi d'une saison à l'autre et entre le jour et la nuit.

Tous ces paramètres sont des éléments interreliés et interagissants du système climatique (figure 1.4). Si un de ces éléments change et perturbe l'équilibre du système, il va probablement s'ensuivre des réactions complexes de certains autres, voire de tous, à mesure que le système s'ajustera pour atteindre un nouvel équilibre. Certaines réactions peuvent survenir très rapidement, et d'autres extrêmement lentement. Qui plus est, certaines peuvent accentuer le changement initial

FIGURE 1.2

Déséquilibre thermique annuel net selon la latitude



Source : GTI – DRE du GIEC 1995.

FIGURE 1.3

Distribution estimative des pluies quotidiennes moyennes sur la surface de la Terre (en mm/jour)

Source : Projet mondial d'établissement d'une climatologie des précipitations.

(processus appelé rétroaction positive), et d'autres s'y opposer et le compenser partiellement (rétroaction négative). Par exemple, tout ce qui fera changer la quantité d'énergie solaire entrant dans l'atmosphère ou la quantité de cette énergie absorbée dans l'atmosphère fera changer l'apport d'énergie qui alimente le système climatique. De même, un changement de la quantité nette d'énergie renvoyée vers l'espace par le système climatique induira un changement du mécanisme de refroidissement de la Terre. Ces changements initiaux entraîneront des réactions et des rétroactions dans le reste du système, jusqu'à ce qu'il arrive à un nouvel équilibre entre l'énergie entrante et l'énergie sortante au sommet de l'atmosphère.

Parmi les causes possibles de ces changements primaires de la quantité de rayonnement solaire absorbé ou d'énergie thermique émise (les « forçages radiatifs ») figurent les variations des concentrations atmosphériques des aérosols et des gaz à effet de serre, les changements des propriétés réfléchissantes de la surface de la Terre et les modifications de l'intensité du rayonnement solaire qui atteint l'atmosphère de la planète. Les études des climats passés montrent clairement que de tels changements se produisent constamment, à des échelles de temps allant du mois au million d'années, et, dans l'espace, de l'échelle locale au niveau régional et même planétaire. Cependant, il est intéressant de noter que les reconstructions des régimes de température passés suggèrent que ces fluctuations naturelles, bien que suffisantes pour avoir des conséquences énormes sur les écosystèmes planétaires, sont restées pendant de nombreux millions d'années dans la plage relativement étroite nécessaire à la vie sur la Terre.

LES CLIMATS DU PASSÉ

La reconstruction du climat

Le système climatique naturel de la Terre est en fait en constante évolution : c'est un système dynamique. Des forces tant internes qu'externes modifient continuellement le délicat équilibre qui règne au sein de chacun de ses éléments et entre eux. Les informations tirées des sédiments terrestres, marins et lacustres, des récifs de corail, des calottes glaciaires et même de la végétation attestent clairement que des changements majeurs

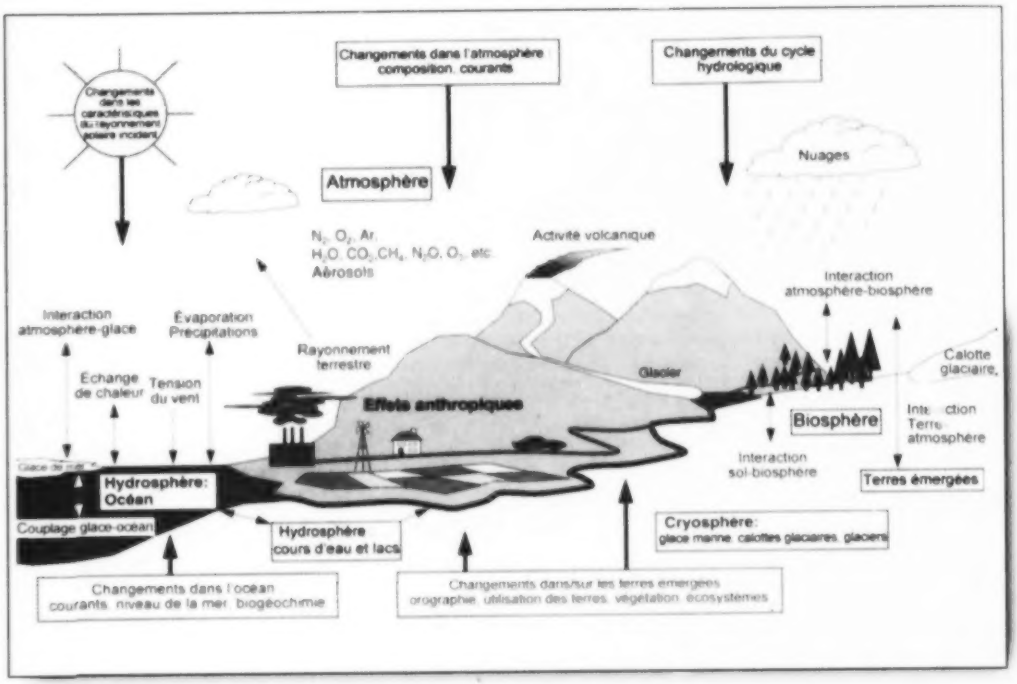


FIGURE 1.4

Le réseau complexe des composants et rétroactions du système climatique planétaire

Source : GTI – TRE du GIEC 2001

du climat du globe sont déjà survenus dans le passé. Elles donnent aussi à penser que des changements de cet ordre se reproduiront de manière naturelle.

Les informations les plus exactes dont nous disposions sur les climats passés sont les données recueillies depuis 100 à 150 ans à des stations climatologiques ou autres stations d'observation. Enregistrées à l'aide d'instruments de précision par des observateurs compétents, elles sont non seulement raisonnablement fiables, mais aussi très complètes, présentant les variations quotidiennes et même horaires des conditions sur la plupart des régions habitées de la planète. Ces dernières années, il est venu s'y ajouter des mesures des conditions en surface et dans l'atmosphère, prises d'un pôle à l'autre par des appareils sophistiqués embarqués sur des plates-formes satellitaires. Les deux types d'enregistrements sont devenus des bases de données très utiles pour identifier et analyser les régimes climatiques du dernier siècle ou à peu près, et y détecter des fluctuations même relativement petites.

Pour étudier les grandes fluctuations du climat survenues sur des périodes plus longues, les scientifiques doivent recourir à des sources de données substitutives – autrement dit, des indications indirectes dont on peut déduire ou dériver la nature des conditions climatiques du passé. Des documents faisant état des conditions météorologiques, surtout dans des régions comme l'Europe et l'Asie pour lesquelles on dispose de vastes archives, peuvent constituer une base utile de l'analyse de certains aspects des climats au cours des 1000 dernières années. Même s'ils n'offrent pas le type de données quantitatives fiables des enregistrements récents, ces documents peuvent néanmoins fournir une importante information qualitative sur les climats passés.

Pour les régions n'offrant pas de tels enregistrements anecdotiques et pour les époques antérieures au dernier millénaire, la reconstruction des climats passés repose essentiellement sur la profusion d'indicateurs paléoclimatiques que fournit la Terre elle-même. Les pollens présents dans les marais anciens, dans les sédiments lacustres ou marins, et même dans les calottes glaciaires, peuvent révéler ce qu'étaient les saisons de croissance au moment où ils se sont déposés. Les restes de formes de vie aquatiques trouvés dans les sédiments lacustres témoignent des températures, de la qualité et de l'abondance passées des eaux douces, et les sédiments et coraux des océans fournissent des informations sur la température et la salinité des mers. Les anciennes plages indiquent où se situait le trait de côte et donc le niveau de la mer. Même les bulles d'air

fossilisées dans les inlandsis des régions polaires montrent la composition des masses d'air du passé, pendant que la glace qui les entoure fournit de l'information sur leur température et sur les mécanismes de transport atmosphérique qui les régissaient. Les anneaux de croissance des arbres, la composition et la structure du sol et le profil thermique vertical de la croûte terrestre ont aussi des secrets à révéler. À partir de cet assortiment disparate et claiseme d'indices, les paléontologues ont recueilli suffisamment d'informations pour que nous puissions construire un tableau relativement continu, bien que certes fragmenté, des régimes et tendances de la température à la surface de la Terre sur le dernier million d'années, et même plus loin.

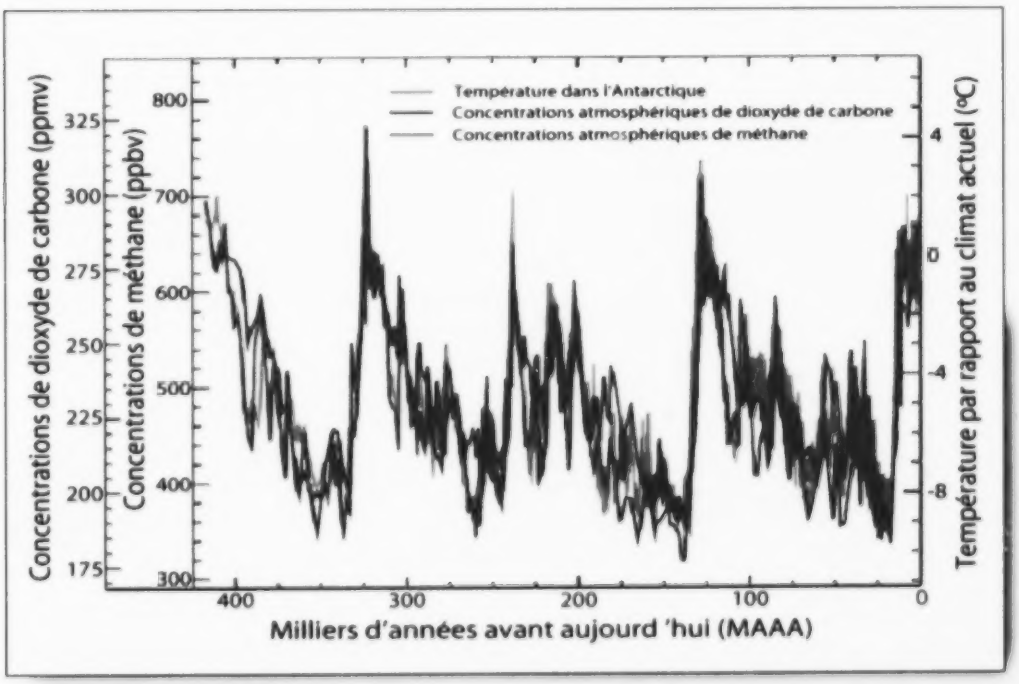
Le dernier million d'années

On peut se faire une idée de l'évolution du climat de la Terre dans le dernier million d'années à partir des enregistrements de température de l'Antarctique, reconstruits à partir des données de carottes de glace (figure 1.5). Pendant une grande partie de cette période, les températures semblent avoir suivi un cycle de variations à long terme quasi périodiques. Il y aurait eu des minimums extrêmes, correspondant aux grandes glaciations planétaires, à des intervalles d'environ 100 000 ans. Chaque période glaciaire a été suivie d'un réchauffement marqué (4 à 6 °C) menant à une phase interglaciaire. À l'intérieur de ce cycle de 100 000 ans, on observe des anomalies plus petites à périodicité d'environ 20 000 et 40 000 ans.

De nombreuses théories ont été avancées pour expliquer ces variations de la température. L'hypothèse la plus généralement acceptée pour les variations à récurrences d'environ 20 000, 40 000 et 100 000 ans est l'existence de changements dans le battement (angle de précession) et l'obliquité de l'axe de la Terre par rapport à son orbite et dans l'excentricité (forme d'ellipse) de son orbite autour du Soleil. Ces changements influent sur la saisonnalité et sur la distribution du rayonnement solaire sur la Terre. Toutefois, bien que les grands cycles glaciaire-interglaciaire qui prennent place à l'échelle de 100 000 ans soient bien corrélés avec les changements de l'excentricité de l'orbite, le forçage causé par ces derniers est de loin trop faible pour expliquer en totalité cette cyclicité. Il semble donc que d'autres processus de rétroaction interviennent pour amplifier significativement le forçage en question.

FIGURE 1.5

Une reconstruction des températures annuelles moyennes en Antarctique au cours des 400 000 ans



Source : GTI – TRE du GIEC 2001

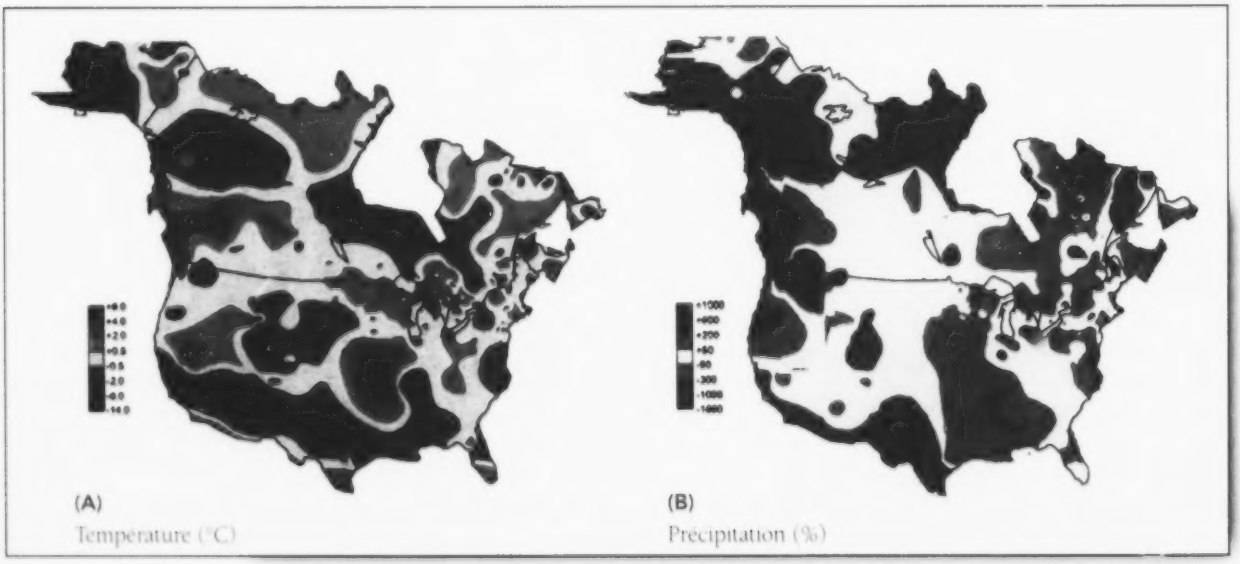
Des analyses récentes de carottes de glace prélevées en Antarctique et au Groenland révèlent elles aussi une forte corrélation entre les changements à long terme des climats du passé et les concentrations atmosphériques naturelles du dioxyde de carbone (CO_2), du méthane (CH_4) et de l'hémioxyde d'azote (N_2O), trois importants gaz à effet de serre. Comme le montre la figure 1.5, il y a eu au cours des 420 000 dernières années une correspondance remarquable entre les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone et de méthane et les températures locales de l'Antarctique. Cette relation suggère qu'un des principaux mécanismes de rétroaction qui amplifient les changements d'origine externe à long terme du bilan énergétique de l'atmosphère, comme ceux qu'induisent les cycles orbitaux, peut être lié à l'effet de serre.

L'actuel interglaciaire, souvent appelé « Holocène », dure maintenant depuis plus de 10 000 ans. Au cours de cette période, les températures d'au moins certaines parties de la planète, surtout en été aux latitudes moyennes à élevées de l'hémisphère Nord, ont atteint un sommet en 5 000 à 6 000 ans BP (avant le présent) environ, et ont légèrement baissé depuis. Ce maximum chaud de l'interglaciaire est appelé « optimum de l'Holocène ». Il n'est cependant toujours pas certain que cet optimum se soit aussi manifesté aux basses latitudes. En fait, de récentes modélisations donnent à penser que les changements de l'insolation du milieu de l'Holocène auraient été propices à des étés plus chauds et des hivers plus froids, et que les températures planétaires annuelles moyennes auraient en fait été légèrement plus basses qu'aujourd'hui.

Ces lentes fluctuations d'échelle millénaire du climat planétaire se sont nécessairement traduites par une grande diversité de climats sur ce qui est maintenant le Canada. En étudiant ces variations, nous pouvons aussi mieux remettre en contexte notre climat actuel et trouver des indications des genres de changements qui pourraient le toucher dans l'avenir. Elles donnent à penser que les modalités du changement peuvent être complexes, les étés ayant été significativement plus chauds, plus secs et plus venteux il y a 6 000 ans qu'aujourd'hui dans certaines régions du Canada, et plus frais et plus humides dans d'autres (figure 1.6).

FIGURE 1.6

Estimations des changements dans le climat de juillet en Amérique du Nord, établies à partir d'analyses des données palynologiques.



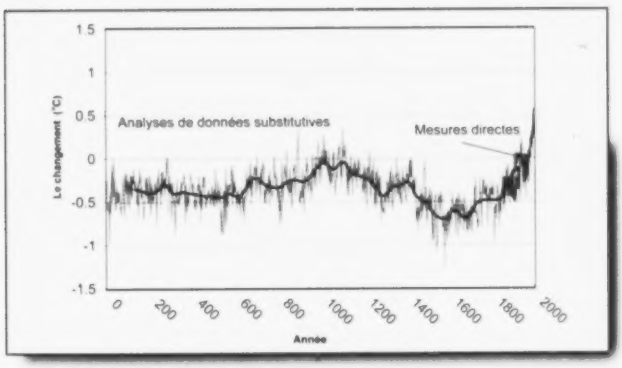
Source : Gajewski et al. 2000.

Les 2000 dernières années

La figure 1.7 illustre les variations des températures moyennes de l'hémisphère Nord au cours des 2 000 dernières années. Basée sur de multiples sources de données substitutives provenant de nombreux endroits du monde (quoique surtout de l'hémisphère Nord), elle suggère que les températures moyennes d'aujourd'hui sont plus élevées que celles d'aucun autre moment des deux derniers millénaires. Il semble pourtant qu'elles soient légèrement plus basses que celles de l'optimum de l'Holocène, et peut-être de 1 à 2 °C inférieures à celles du maximum du dernier interglaciaire, en 135 000 BP.

FIGURE 1.7

Reconstruction des températures annuelles moyennes de l'hémisphère Nord, basée sur des analyses de données substitutives multiples



Source : Moberg et al. 2005.

Pour les fluctuations d'échelle centennale, donc plus courtes, on a obtenu des résultats encourageants en tentant de corréler les changements des cycles de l'irradiance solaire avec les régimes des températures. Ces comparaisons indiquent par exemple que ce forçage solaire a pu être un facteur clé dans le déclenchement des « petits âges glaciaires » qui se sont produits depuis le début de l'Holocène. De même, une grande partie des variations du climat survenues depuis 300 ans semble étroitement liée à la variabilité solaire. Il demeure cependant que l'on ne comprend pas encore bien les mécanismes par lesquels des changements relativement mineurs de l'irradiance solaire peuvent avoir un impact significatif sur le climat.

La figure 1.7 montre que les températures de l'hémisphère Nord étaient en moyenne encore plus basses il y a environ 1000 ans que maintenant; cependant certaines régions peuvent avoir été alors un peu plus chaudes que de nos jours. Il s'agit entre autres de l'ouest de l'Europe, du Groenland et de l'est du Canada. Étant donné que cette période chaude, généralement appelée « optimum médiéval », a duré plusieurs siècles, les limites de la zone arborée et d'autres limites naturelles de la végétation se sont graduellement déplacées vers le nord. Dans l'Arctique, des climats plus doux ont entraîné des réductions substantielles de la couverture de glace de mer. Ces conditions ont pu favoriser non seulement les migrations des Inuits dans l'Arctique, mais aussi la survie et l'établissement en Islande et au Groenland des Vikings venus d'Europe. Ceux-ci semblent en effet avoir pu naviguer librement dans une grande partie de l'archipel canadien et, au Groenland, ils ont pu pratiquer une agriculture viable. Il est ironique de se rappeler les échecs des tentatives menées par les Européens du XVII^{e} au XIX^{e} siècles pour trouver un passage du nord-ouest vers l'Inde. Cet état de choses tient essentiellement au fait que ces tentatives ont commencé après que l'optimum médiéval a fait place au petit âge glaciaire, qui a duré de 1400 aux environs de 1850. Si seulement Franklin avait essayé six siècles plus tôt! Comme les températures de la région sont maintenant redevenues assez semblables à celles de l'optimum médiéval, il est probable que les glaces et la végétation reviennent aux régimes de cette époque, même si le climat ne devient pas plus chaud qu'il ne l'est maintenant.

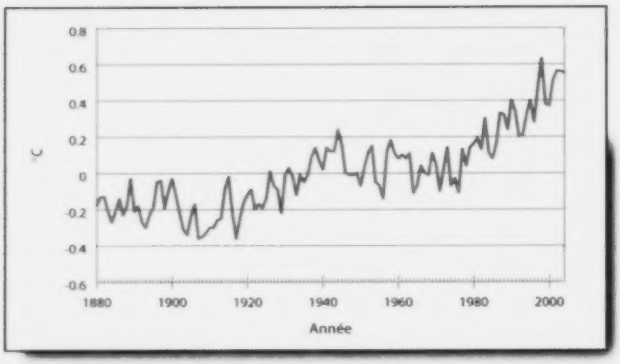
Les 100 dernières années

Le changement climatique du dernier siècle se prête à une étude beaucoup plus fine que celui des périodes précédentes, puisqu'on dispose d'un vaste corpus de données climatologiques recueillies scientifiquement. Ces enregistrements permettent d'analyser les tendances aussi bien spatiales que temporelles des changements, en allant significativement plus dans le détail et avec une marge d'erreur plus étroite.

Les études de ces enregistrements montrent que, même sur la relativement courte durée d'un siècle, le climat de la planète a connu des variations marquées (figure 1.8). Les températures moyennes dans le sud du Canada pour cette période montrent la même tendance générale que celles de la planète : un réchauffement jusqu'au début des années 1940, puis un refroidissement modéré jusqu'au milieu des années 1970, et un nouveau réchauffement, prononcé, jusque dans les années 2000 (figure 1.9). Les températures des années 1990 ont été parmi les plus chaudes enregistrées, 1998 étant l'année la plus chaude tant au Canada que dans le monde entier. La variabilité du réchauffement s'applique aussi aux enregistrements de la température qui couvrent tout le Canada depuis 1950.

FIGURE 1.8

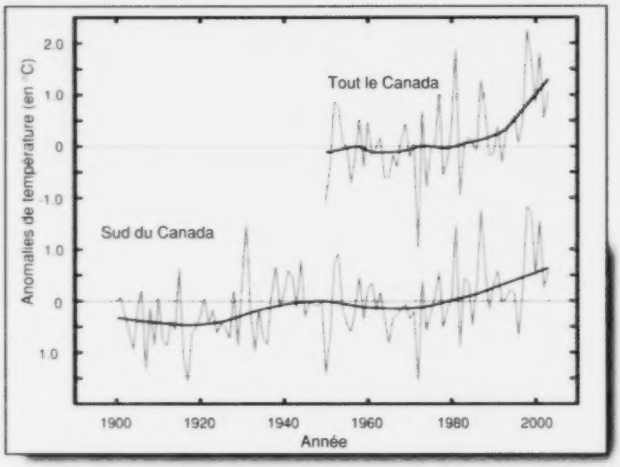
Changements observés des températures planétaires moyennes en surface depuis 1880



Source des données : NOAA

FIGURE 1.9

Tendances observées de la température dans le sud du Canada depuis 1900 et dans tout le Canada depuis 1948

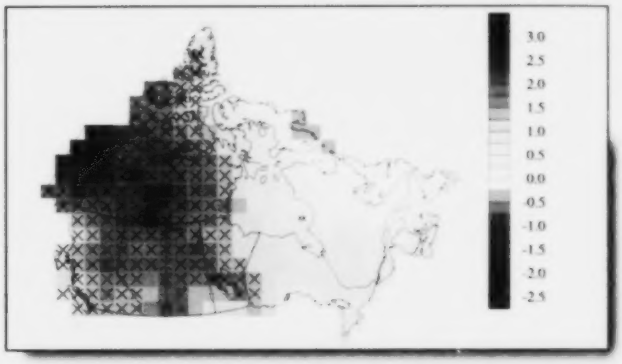


Source : Zhang et al. 2000 (version actualisée 2005)

Bien que le Canada dans son ensemble ait connu une élévation de la température d'un peu plus de 1°C dans les 54 dernières années, ce réchauffement n'a pas été réparti également sur tout son territoire. Dans certaines regions, comme le Yukon et les Territoires du Nord-Ouest, il a été plus élevé, alors que, dans l'île de Baffin dans l'est de l'Arctique, il y a eu en fait un refroidissement modéré (figure 1.10).

FIGURE 1.10

Distribution régionale des tendances linéaires de la température (°C) observées au Canada entre 1948 et 2003

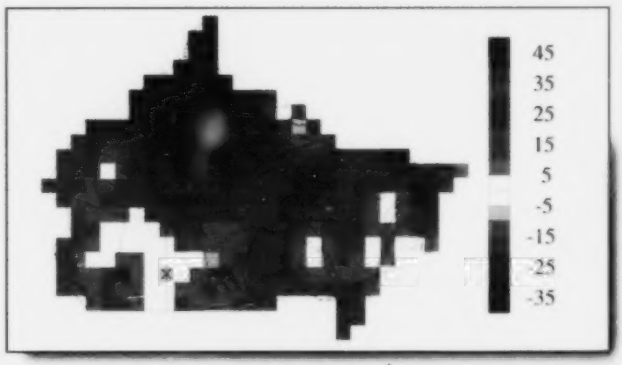


Le symbole X indique les régions où les tendances sont statistiquement significatives
Source : Zhang et al. 2000 (version actualisée 2005)

Les régimes des précipitations ont eux aussi changé. En majeure partie, les quantités ont augmenté significativement sur les Territoires du Nord-Ouest et le Nunavut, et augmenté dans une grande partie du reste du pays. Les seules exceptions sont des baisses faibles des précipitations sur les Prairies et dans le coin est de l'île de Baffin. (Figure 1.11).

FIGURE 1.11

Distribution régionale des tendances linéaires des précipitations (en pourcentage) observées au Canada entre 1948 et 2003



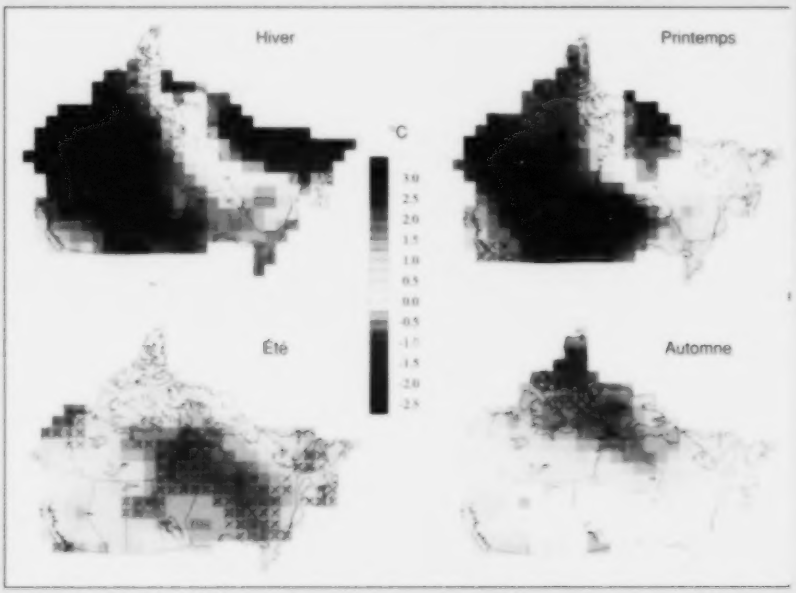
Le symbole X indique les régions où les tendances sont statistiquement significatives
Source : Zhang et al. 2000 (version actualisée 2005)

CHANGEMENTS QUOTIDIENS ET SAISONNIERS DU CLIMAT DU CANADA

Les changements des températures saisonnières montrent un autre aspect de la complexité des tendances de ce paramètre au Canada. Quand on examine les quatre saisons, ce sont l'hiver et le printemps qui présentent les plus grands changements dans les températures, alors que l'été et l'automne montrent des variations beaucoup plus faibles (figure 1.12). Sur le plan régional, ce sont les Prairies qui connaissent le plus grand réchauffement au printemps et un certain refroidissement à l'automne. L'est de l'Arctique montre le plus grand refroidissement en hiver, mais une tendance au réchauffement pour l'été.

FIGURE 1.12

Distribution régionale des tendances linéaires de la température (°C) observées au Canada depuis 1950, par saison

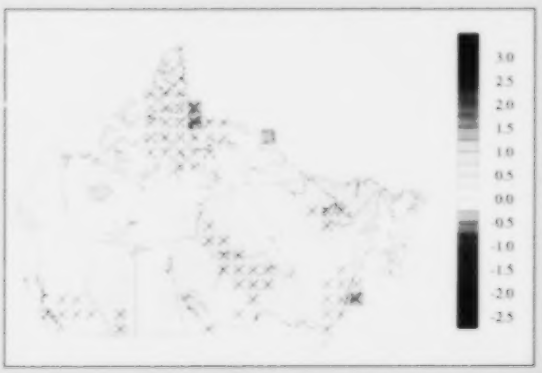


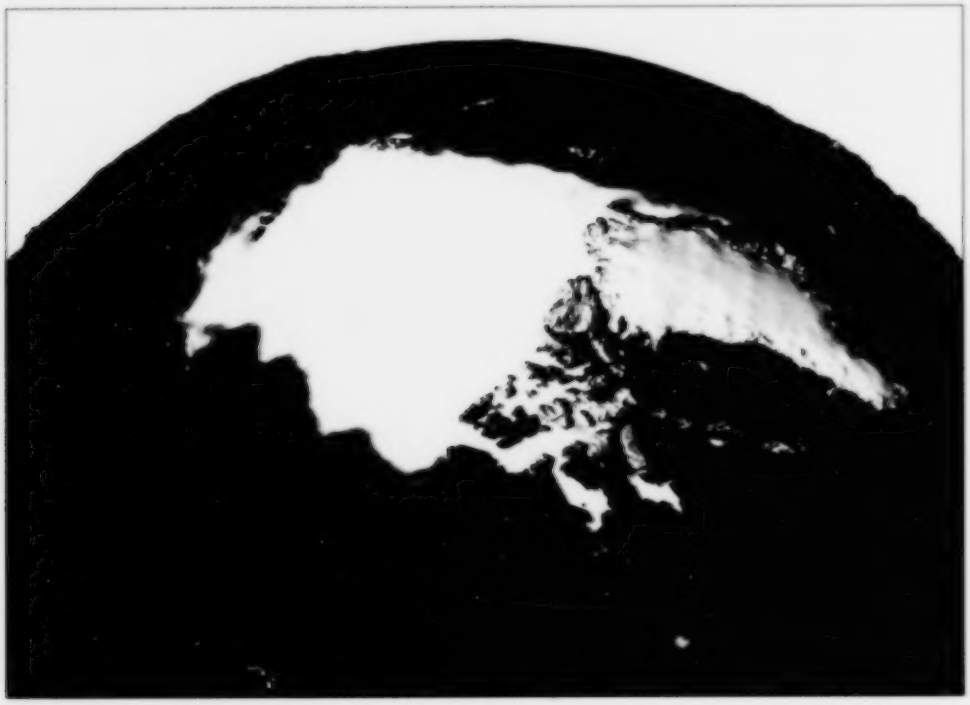
Ces cartes illustrent bien que, au niveau régional, les tendances nationales à un réchauffement du climat sont modifiées par les changements des régimes saisonniers des vents. En altérant le flux net de masses d'air chaud et d'air froid dans les divers régimes du pays, ces changements ont amplifié le réchauffement pour certaines régions et certaines saisons, et l'ont compensé dans d'autres. Cet état de choses rappelle donc que le changement climatique à venir ne sera pas uniforme ni dans le temps ni dans l'espace.

Une autre façon d'analyser les changements de la température consiste à examiner les changements des maximums diurnes et des minimums noctures. Quand on soustrait le changement des maximums diurnes de celui des minimums nocturnes, on calcule l'amplitude thermique quotidienne (ATQ) (figure 1.13) Celle-ci montre que, pour la plupart des régions du Canada, les maximums ont depuis 1950 augmenté légèremenet plus vite que les minimums. Seulement dans des régions des l'île de l'Arctique et du sud du Québec que les minimums s'élèvent plus rapidement.

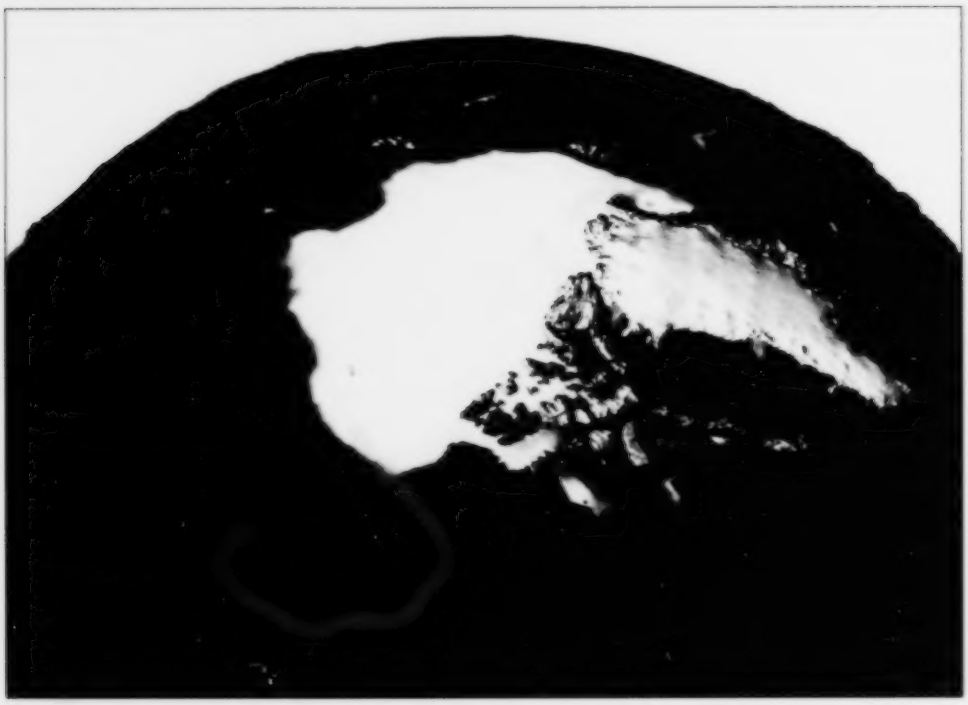
FIGURE 1.13

Distribution régionale des tendances linéaires de l'ATQ observées au Canada depuis 1950





▲ Glace de mer observée en septembre 1979



▲ Glace de mer observée en septembre 2005

Source : NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio

CHAPITRE 2

L'amplification de l'effet de serre

L'analyse des carottes de glace prélevées dans les calottes polaires fournissent des indications précieuses sur les relations passées entre l'effet de serre naturel et le climat de la Terre. Les carottes de l'Antarctique et du Groenland, dont le plus long forage est descendu jusqu'à plus de 2 km sous la glace du pôle Sud, ont à cet égard été particulièrement révélatrices. Grâce à elles, les scientifiques ont pu reconstituer les températures locales et les concentrations de dioxyde de carbone, de méthane et d'hémioxyde d'azote dans les régions polaires au cours des 420 000 dernières années.

À la comparaison, ces reconstructions de la température et des concentrations de gaz à effet de serre montrent une corrélation remarquable, surtout pendant la transition entre les périodes glaciaires froides et les interglaciaires chauds (voir la figure 1.5, au chapitre 1). Les processus qui régissent cette relation ne sont pas encore bien connus, mais la plupart des experts s'entendent à dire que ce sont probablement des changements du rayonnement solaire, dus aux variations de l'orbite de la Terre autour du Soleil, qui ont déclenché les changements initiaux du climat. Ceux-ci semblent avoir à leur tour causé des modifications importantes des circulations atmosphérique et océanique et des échanges de gaz à effet de serre avec l'atmosphère. Les gaz à effet de serre intervenant pour limiter les pertes de chaleur de la planète, des changements de leurs concentrations ont joué un rôle crucial en accentuant le changement climatique initial et en contribuant substantiellement à la très grande différence des températures planétaires moyennes entre les époques glaciaires et interglaciaires.

Les carottes de glace confirment que les concentrations de gaz à effet de serre présentent une variabilité naturelle avec le temps, mais elles montrent aussi qu'il y a des limites naturelles à ces variations. Au cours des 420 000 années, les concentrations de dioxyde de carbone ne sont jamais descendues au-dessous d'environ 180 parties par million en volume (ppmv). Et, jusqu'à récemment, elles ne sont jamais non plus montées au-dessus d'environ 300 ppmv. De même, les concentrations de méthane sont restées sur une plage relativement étroite, de 0,3 à 0,7 ppmv.

Des mesures récentes des concentrations de gaz à effet de serre sur les derniers siècles, issues elles aussi de carottes de glace, montrent l'émergence d'un important écart par rapport aux conditions passées. Cet état de choses est corroboré par des mesures directes des tendances de la composition de l'atmosphère dans les dernières décennies, qui montrent que les concentrations de dioxyde de carbone moyennées sur la planète dépassaient 375 ppmv en 2003. Comme le montre la figure 1.5, ces valeurs dépassent de plus de 20 % les plus hautes observées dans les 420 000 dernières années. En fait, les enregistrements paléoclimatiques à long terme des sédiments océaniques donnent à penser que ces taux pourraient même n'avoir jamais été atteints depuis au moins 20 millions d'années. En même temps, les concentrations de méthane semblent avoir plus que doublé depuis la période pré-industrielle, et celles d'hémioxyde d'azote ont connu une hausse plus modeste, de 17 %. Si ces gaz sont effectivement les principaux acteurs de l'effet de serre naturel, l'augmentation de leurs concentrations en laisse présager une accentuation qui dépasserait de loin les conditions suggérées par l'enregistrement des carottes de glace.

Ces dernières années, on a consacré beaucoup d'efforts de recherche à mesurer avec plus d'exactitude les concentrations de ces gaz. Parallèlement, les scientifiques ont tenté de mieux comprendre les processus en jeu dans leur libération et leur extraction de l'atmosphère, et d'estimer les concentrations futures probables.

LE DIOXYDE DE CARBONE

Comprendre comment évolue la quantité de dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère n'est pas une tâche facile. En effet, ce gaz est constamment retiré de l'air par absorption directe dans l'eau et par transfert de l'atome de carbone à des substances biotiques par l'entremise de la photosynthèse; il est

également libéré dans l'air par la respiration des végétaux et des animaux, par la décomposition de la biomasse morte et de la matière organique du sol, par le dégazage des surfaces d'eau et par la combustion. De petites quantités de dioxyde de carbone sont aussi injectées directement dans l'atmosphère par les éruptions volcaniques, et par des processus géologiques plus lents, comme la météorisation des roches.

Sur tout l'écosystème de la Terre, c'est la biosphère terrestre, l'atmosphère et les océans qui constituent les puits de carbone les plus actifs, avec respectivement environ 600, 750 et 39 000 milliards de tonnes de carbone. L'atmosphère en échange chaque année environ 90 milliards de tonnes avec les océans et 60 milliards de tonnes avec la biosphère terrestre.

Les sols, roches et combustibles carbonés de la Terre sont aussi de grands réservoirs de carbone. Selon les estimations, les sols pourraient en contenir jusqu'à 1600 milliards de tonnes, les combustibles carbonés fossiles environ 5000 milliards de tonnes, et les roches encore beaucoup plus (quantité estimative de 75 millions de milliards de tonnes). Cependant, ces réservoirs, à moins de perturbation d'origine non naturelle, ne contribuent aux échanges de carbone avec l'atmosphère que très lentement, sur une échelle de temps allant des milliers aux millions d'années.

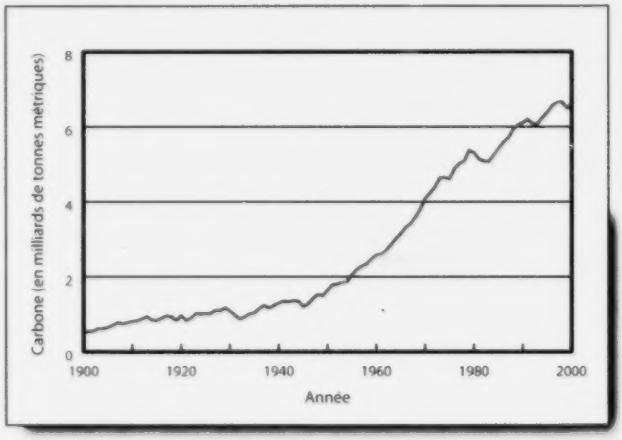
Si, avec le temps, les réservoirs terrestres et océaniques libèrent plus de carbone dans l'atmosphère qu'il n'en est extrait, il s'ensuit une augmentation nette de l'abondance du carbone dans l'atmosphère (sous la forme de dioxyde de carbone). Inversement, s'il est extrait plus de carbone de l'atmosphère qu'il n'y en est rejeté, sa concentration y baisse. Cependant, les données des carottes de glace indiquent que la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone est restée relativement constante, entre 260 et 280 ppmv, dans les 10 000 dernières années du présent interglaciaire, du moins jusqu'à il y a quelques siècles. Cela signifie que le flux actif naturel de carbone entre la biosphère, les océans et l'atmosphère (le « bilan planétaire du carbone ») est resté dans un équilibre remarquable. Autrement dit, en moyenne, la quantité rejetée chaque année dans l'atmosphère a été sensiblement équivalente à la quantité qui en a été extraite.

Il semble maintenant que les activités humaines influent significativement sur l'équilibre naturel du cycle planétaire du carbone. Cette influence de l'homme a en fait commencé à se faire sentir il y a plus de 8000 ans, lorsque nos lointains ancêtres ont défriché des terrains et les ont cultivés pour nourrir les civilisations naissantes. Cependant, c'est la rapide croissance démographique des derniers siècles, à l'origine de conversions de grande échelle des paysages forestiers à des fins d'agriculture, d'urbanisation ou autres, qui a considérablement fait augmenter l'impact de ces conversions sur le cycle du carbone. Elles ont en effet causé la libération de plus de 100 milliards de tonnes supplémentaires de carbone dans l'air au cours du dernier siècle, et se sont accélérées dans les dernières décennies, surtout à cause des activités généralisées de culture sur brûlis dans les forêts tropicales d'Amérique du Sud, d'Afrique et d'Asie du Sud-Est. Bien que la nouvelle croissance des forêts reboisées aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord puisse compenser partiellement ces rejets, on estime que la biosphère injecte directement chaque année dans l'atmosphère une quantité nette de 0,6 à 2,5 milliards de tonnes de carbone imputable aux activités humaines d'utilisation des terres et de changement d'affectation des terres.

Quoi qu'il en soit, un facteur beaucoup plus important est l'extraction toujours croissante de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) de la croûte terrestre pour répondre aux besoins en énergie d'une société planétaire de plus en plus industrialisée. Lors de la combustion, le carbone contenu dans les combustibles fossiles est oxydé et libéré sous la forme de dioxyde de carbone, chaque tonne de carbone brûlé

FIGURE 2.1

Teneur en carbone des émissions annuelles de dioxyde de carbone dues à la combustion de combustibles fossiles et à la production de ciment, 1900-2000



Sources des données : CDIAC en ligne

produisant 3,7 tonnes de dioxyde de carbone. La production de ciment contribue elle aussi un peu (environ 2 %) à ces rejets. Dans les années 1990, ces sources ont en moyenne injecté chaque année dans l'atmosphère une quantité estimative de 6,4 milliards de tonnes métriques de carbone, ou environ 23 milliards de tonnes de dioxyde de carbone, soit plus de 10 fois les émissions estimatives d'il y a un siècle (figure 2.1).

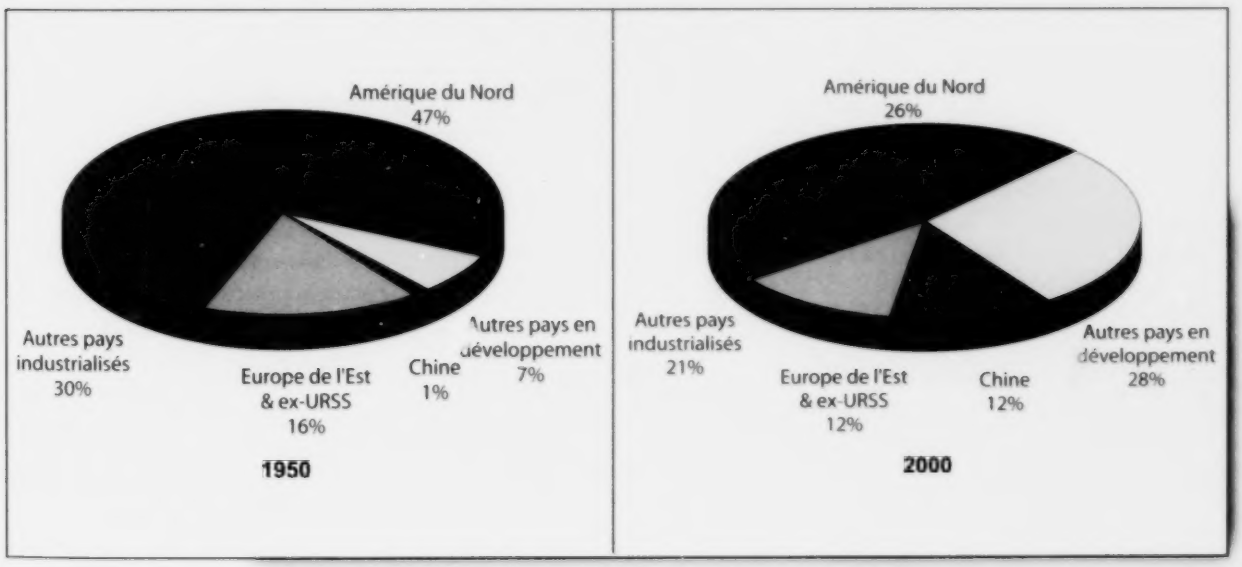
Bien évidemment, les rejets de dioxyde de carbone provenant de la combustion de combustibles fossiles sont très inégalement répartis sur la planète, et ce sont les pays industrialisés de l'hémisphère Nord qui y contribuent le plus. Mais les émissions augmentent en plus rapidement dans nombre de pays en développement (figure 2.2), surtout l'Asie du Sud-Est.

Les rejets anthropiques de dioxyde de carbone sont en fait relativement petits en comparaison des quantités absolument énormes que les processus naturels injectent dans l'air et en extraient chaque année. En effet, les activités humaines libèrent chaque année environ 1/20 de la quantité de dioxyde de carbone produite par la nature. Mais ces émissions humaines constituent un ajout net d'un seul côté du cycle planétaire du carbone, qui est déjà en équilibre incertain. Avec le temps, cet ajout net peut entraîner une accumulation significative de dioxyde de carbone excédentaire dans l'atmosphère, de la même manière qu'un déficit financier, répété année après année, peut se traduire par l'accumulation d'une dette importante.

Depuis une quarantaine d'années, les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone sont soigneusement mesurées à de nombreux endroits du globe, et les résultats mettent clairement en évidence les conséquences des émissions anthropiques. Les tendances (figure 2.3) montrent des taux actuels d'augmentation d'environ 1,6 ppmv, ou 0,4 %, par an et une augmentation nette de 19 % depuis 45 ans. Les concentrations sont maintenant de l'ordre d'environ 375 ppmv, soit de plus de 30 % supérieures aux valeurs de l'époque pré-industrielle de 280 ppmv mesurées dans les carottes de glace. L'augmentation constatée dans les récentes décennies est en fait significativement plus basse qu'elle ne le serait si tout le dioxyde de carbone rejeté du fait des activités humaines restait dans l'atmosphère. En effet, environ 50 à 60 % des émissions anthropiques plus récentes semblent retourner dans le cycle naturel. Bien que le puits net de ce carbone ne soit pas bien compris, on pense que les océans et les écosystèmes terrestres

FIGURE 2.2

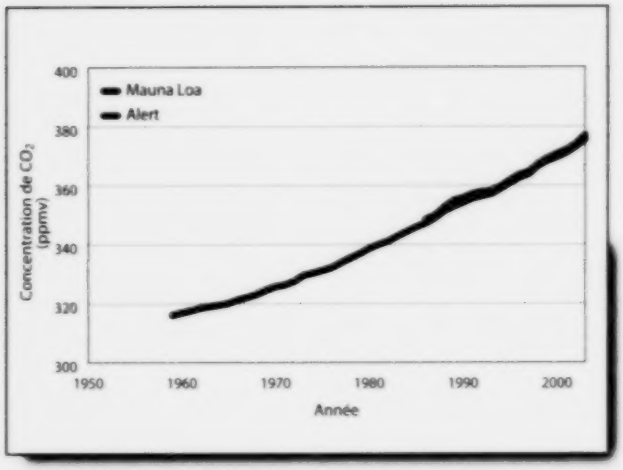
Distribution régionale des émissions de CO_2 dues à la combustion de combustibles fossiles, 1950 et 2000



Sources des données : CDIAC en ligne

FIGURE 2.3

Concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone depuis 1959



en sont d'importants récepteurs. Autrement dit, l'absorption naturelle de carbone par ces systèmes compense une partie de l'interférence humaine, mais seulement une partie.

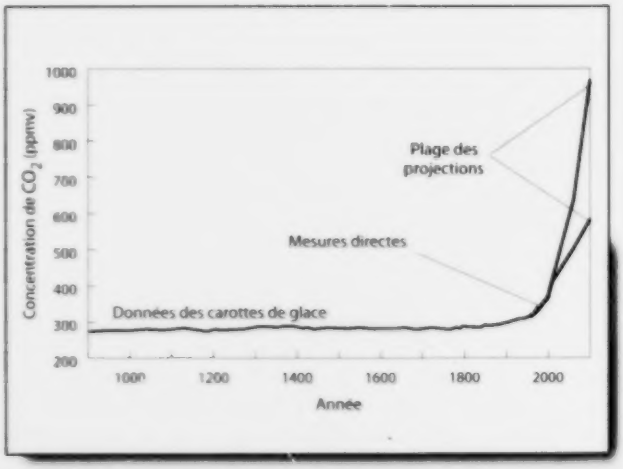
Il est très difficile de prévoir quelles seront les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone dans l'avenir. La plus grande incertitude est liée aux taux futurs d'émission des activités humaines, qui dépendront d'un certain nombre de variables. Par exemple, quel sera le taux de la croissance démographique mondiale? Utiliserons-nous les mêmes types d'énergie que maintenant? Saurons-nous utiliser l'énergie de façon plus efficace? Jusqu'à quel point les pays en développement vont-ils améliorer leur niveau de vie, et donc accroître leur consommation d'énergie? Les changements d'affectation des terres liés au déboisement et à la dégradation des forêts vont-ils continuer de dépasser les efforts d'augmentation de la productivité de celles-ci? Les réponses à ces questions dépendront à leur tour de décisions humaines, de politiques et de progrès technologiques et socio-économiques, qui sont en soi hautement imprévisibles. Des experts avancent que, lorsque toutes ces questions sont prises en compte, les émissions annuelles de dioxyde de carbone par les sources humaines en 2100 pourraient, comparativement aux émissions de 1990, aller d'une valeur basse de 70 % (en présumant des progrès significatifs de l'efficacité énergétique et une utilisation généralisée de sources d'énergie autres que les combustibles fossiles) à une valeur haute de 500 % (en présumant que l'efficacité énergétique ne fasse pas de gains et qu'on utilise davantage le charbon).

Il existe d'autres incertitudes, moindres mais encore importantes, quant au pourcentage de ces rejets de dioxyde de carbone qui restera dans l'atmosphère. Le système naturel va-t-il continuer à absorber dans la biosphère terrestre et les océans plus de 50 % de rejets anthropiques de dioxyde de carbone? Ou la fraction qui reste dans l'atmosphère va-t-elle augmenter avec le temps? La réponse n'est toujours pas claire, et exigera que soient menés d'autres vastes travaux de recherche et d'observation du cycle naturel du carbone.

Une fois ces incertitudes prises en compte, nos meilleures estimations des concentrations atmosphériques futures de dioxyde de carbone donnent une gamme de scénarios. Le plus pessimiste suggère des concentrations doubles des niveaux pré-industriels au milieu du XXI^{e} siècle et triples en 2100. Un scénario optimiste envisage des concentrations légèrement inférieures au double des valeurs pré-industrielles en 2100 (figure 2.4).

FIGURE 2.4

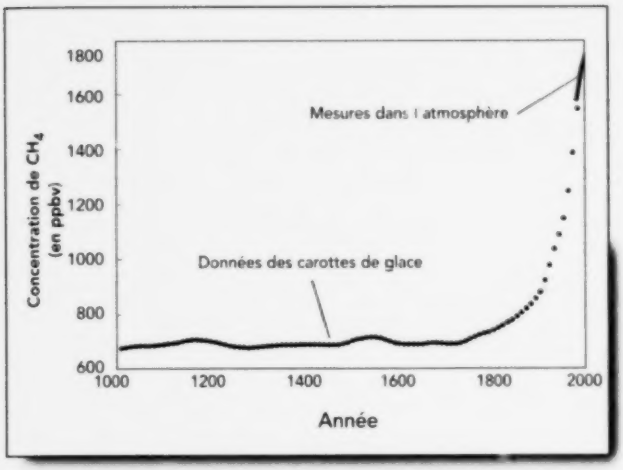
Projections des concentrations atmosphériques futures de CO_2, par rapport aux concentrations du dernier millénaire



Sources des données : CDIAC en ligne; GIEC 2001.

FIGURE 2.5

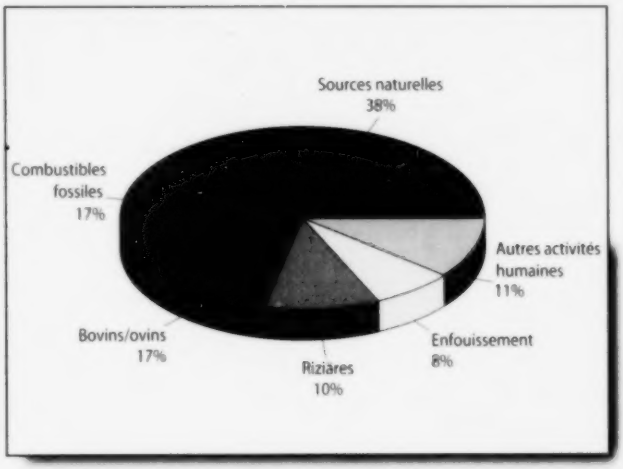
Tendances des concentrations de méthane au cours du dernier millénaire



Sources des données : CDIAC en ligne

FIGURE 2.6

Contribution estimative des diverses sources aux émissions planétaires totales de méthane



Sources des données : CDIAC en ligne

LE MÉTHANE

Le méthane (CH_4) est produit naturellement par la décomposition de la matière organique en l'absence d'oxygène. Depuis 1978, on en mesure en continu les abondances dans l'atmosphère, ce qui a permis de constater que les concentrations actuelles sont d'environ 1750 parties par milliard en volume (ppbv), soit une augmentation d'environ 150 % par rapport aux valeurs de l'époque pré-industrielle (700 ppbv) observées dans les carottes de glace (figure 2.5). Entre 1978 et le début des années 1990, les concentrations ont continué d'augmenter, à raison d'environ 10 à 15 ppbv/an. Ces dernières années, cependant, elles n'ont monté que très peu, pour une raison qui n'est pas encore claire. Cet état de choses pourrait être dû à des changements du taux des émissions humaines, mais on a aussi des indications que des changements des émissions naturelles aux latitudes élevées pourraient jouer un rôle important.

Comme pour le dioxyde de carbone, il se produit des échanges naturels de méthane entre la surface de la Terre et l'atmosphère. Les milieux humides en sont une grande source – d'où son nom courant de « gaz des marais »; il en est également produit par les processus digestifs de certains insectes et ruminants, comme les termites, les ovins et les bovins. Bien que la superficie totale de milieux humides naturels soit probablement en train de rétrécir du fait de l'interférence humaine, celle des rizières montre une augmentation rapide, et la population mondiale de bétail a quadruplé dans le dernier siècle. Les autres sources de méthane sont des procédés industriels, l'extraction de combustibles fossiles et la décomposition des déchets dans des décharges (figure 2.6).

Contrairement au dioxyde de carbone, cependant, le méthane est extrait de l'atmosphère surtout par des processus chimiques faisant intervenir le radical hydroxyle, OH. Ces interactions chimiques finissent par produire de l'eau et du dioxyde de carbone. Une petite quantité de méthane est également absorbée directement par les sols.

L'augmentation des émissions de méthane est surtout due à la croissance mondiale des activités agricoles et de l'utilisation de combustibles fossiles comme sources d'énergie, deux facteurs qui sont liés à la rapide croissance démographique mondiale. Comme la population mondiale a peu de chances de se stabiliser d'ici au moins un siècle, on peut s'attendre à ce que ces changements perdurent et que les rejets de méthane augmentent encore. En même temps, le taux d'extraction du méthane de l'atmosphère par les processus naturels pourrait se modifier, puisque l'abondance du radical OH est sensible à la pollution atmosphérique à l'échelle mondiale, et en particulier à

l'ozone troposphérique. Malgré des incertitudes quant à ces changements, les experts pensent que les concentrations atmosphériques de méthane vont continuer de monter pendant au moins 50 ans. Ils projettent qu'en 2100, elles se situeront entre environ 1500 ppbv (soit 15 % de moins qu'aujourd'hui) et 3700 ppbv (ou 110 % de plus que de nos jours).

LES AUTRES GAZ À EFFET DE SERRE

La concentration ***d'hémioxyde d'azote*** (N_2O, aussi appelé oxyde nitreux) dans l'atmosphère augmente maintenant de 0,2 à 0,3 % par an. Le niveau actuel est d'environ 319 ppbv, soit quelque 17 % au-dessus des valeurs pré-industrielles. Bien que l'on comprenne encore mal tant le cycle naturel de l'hémioxyde d'azote que l'ampleur de ses sources anthropiques, on pense que ce sont les émissions des sols agricoles et des déjections animales qui contribuent le plus aux augmentations des concentrations atmosphériques de N_2O. Parmi les autres grands contributeurs figurent la production industrielle de nylon et d'acide nitrique, le brûlage de la biomasse, et la combustion de combustibles fossiles dans des véhicules équipés de convertisseurs catalytiques.

L'***ozone*** (O_3) est naturellement présent dans les 10 à 15 premiers kilomètres de l'atmosphère (autrement dit, dans la troposphère) en très faibles concentrations. Une grande partie de cet ozone de fond descend de la haute atmosphère (la stratosphère), où il est produit directement par l'action du rayonnement solaire sur l'oxygène. Cependant, depuis environ un siècle, il est produit en quantités croissantes près de la surface de la Terre, lors de réactions chimiques faisant intervenir les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, d'autres polluants atmosphériques et le rayonnement solaire. Ces polluants sont dus en grande partie aux transports et à des procédés de combustion stationnaire. C'est pourquoi, comme l'ozone se décompose très rapidement, ses concentrations dans la troposphère sont maximales sous le vent des régions industrialisées et minimales aux endroits très éloignés de ces régions, surtout sur les océans de l'hémisphère Sud. On pense maintenant que les moyennes planétaires des concentrations dans la troposphère sont d'environ 35 % plus élevées qu'à l'époque pré-industrielle. Le taux de croissance des concentrations d'ozone troposphérique dans les régions très industrialisées de l'hémisphère Nord semble avoir baissé significativement depuis les années 1980, alors que ceux du sud et du sud-est de l'Asie ont augmenté.

Les tendances des concentrations d'ozone dans la haute troposphère, où il constitue un gaz à effet de serre très efficace, n'ont pas encore été bien observées et sont donc mal comprises. L'amincissement de la couche d'ozone de la basse stratosphère sous l'effet des chlorofluorocarbures (CFC) et d'autres substances destructrices d'ozone (voir plus bas) peut aussi jouer un rôle significatif pour atténuer les effets de réchauffement dus à l'augmentation des concentrations de ce gaz dans la troposphère. L'impact net de l'évolution des concentrations d'ozone sur l'effet de serre n'est donc toujours pas clair.

Les ***halocarbures*** contenant du chlore, du fluor et du brome sont, à nombre égal de molécules, parmi les gaz à effet de serre les plus puissants dans l'atmosphère (voir l'encadré « Gaz à effet de serre : une comparaison »). En général, il ne s'agit pas de substances d'origine naturelle, mais de substances produites industriellement en quantités significatives. Les plus connus de ce groupe sont les CFC, qui ont été très utilisés comme solvants, réfrigérants, propulseurs d'aérosols et agents moussants. Les halons, des composés bromés utilisés dans la lutte contre les incendies, jouent eux aussi un rôle non négligeable.

Du fait que ces halocarbures, et nombre d'autres, sont très stables et n'entrent pas facilement dans des réactions chimiques avec d'autres gaz, chaque molécule injectée dans l'atmosphère peut y rester pendant des décennies, voire des siècles, jusqu'à ce qu'elle finisse par être dissociée dans la haute atmosphère par l'intense rayonnement ultraviolet ou qu'elle s'échappe dans l'espace. Un grand nombre de ces substances, quand elles se dissocient, libèrent des atomes de chlore, de brome et/ou de fluor qui peuvent alors appauvrir la couche d'ozone stratosphérique. Bien que les concentrations atmosphériques des principaux CFC soient très basses, pour certains d'entre eux elles ont jusqu'à récemment augmenté à raison de plus de 4 % par an, ce qui en fait des facteurs significatifs d'amplification de l'effet de serre. Les concentrations de CFC ont pourtant récemment commencé à se stabiliser et même, pour certains, à baisser, grâce aux actions internationales mises en œuvre en application du Protocole de Montréal. De plus, l'effet de serre direct de ces substances, comme celui de l'ozone troposphérique, peut être indirectement compensé par l'appauvrissement de la couche d'ozone et le refroidissement de la basse stratosphère qui s'ensuit. C'est pourquoi, comme avec l'ozone, on n'a pas encore de certitude quant à l'effet net des halocarbures destructeurs d'ozone sur le système climatique.

La vapeur d'eau est en fait le plus important contributeur à l'effet de serre naturel. Des études donnent même à penser que, si elle était le seul gaz à effet de serre présent dans l'atmosphère, l'effet de serre naturel serait encore environ 65 % de ce qu'il est avec la totalité des gaz à effet de serre. Cependant, la vapeur d'eau n'est pas en soi une cause ***première*** des changements dans l'effet de serre. C'est plutôt un facteur important parce qu'il intervient dans un certain nombre de grandes rétroactions du système climatique, tant positives que négatives, déclenchées par l'élévation des températures due à d'autres causes premières de changement. L'effet net de ces rétroactions en réponse à une amplification initiale de l'effet de serre devrait être une augmentation de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, puisque de l'air plus chaud peut renfermer plus d'humidité, et que des températures plus élevées devraient faire évaporer davantage d'eau de la surface de la Terre. C'est pourquoi on pense que les rétroactions de la vapeur d'eau devraient s'ajouter de façon significative à toute amplification de l'effet de serre causée par une augmentation des concentrations d'autres gaz à effet de serre. Cependant, l'ajout d'humidité dans l'atmosphère peut aussi faire croître la formation de nuages, qui peuvent significativement réduire la quantité d'énergie solaire réchauffant le système climatique terrestre, ce qui compenserait au moins partiellement l'amplification de l'effet de serre causée par la vapeur d'eau. Bien que ces rétroactions ne soient pas encore parfaitement comprises et donc difficiles à quantifier avec confiance, les experts s'entendent à dire qu'elles sont significatives et positives.

LES AUTRES INFLUENCES HUMAINES

L'amplification de l'effet de serre naturel sera sans aucun doute l'effet premier des activités humaines sur le climat planétaire. Mais ces activités peuvent aussi considérablement influer sur le climat aux échelles locale et régionale, et les effets de certaines d'entre elles pourraient à terme devenir significatifs à l'échelle planétaire.

■ ***Changement d'affectation des terres*** – À mesure que l'homme remplace les forêts et autres types naturels de végétation par des champs, de l'asphalte ou du béton, il modifie substantiellement la façon dont la surface de la Terre réfléchit le rayonnement solaire et libère de la chaleur. En règle générale, les terres inondées et les sols humides absorbent plus de rayonnement solaire qu'un couvert forestier, et les stationnements pavés plus que les prairies. De plus, les déserts créés par le déboisement et le surpâturage réfléchissent plus de rayonnement solaire que la végétation naturelle, et les champs couverts de neige plus que les forêts qu'ils remplacent. Ces changements peuvent en outre influer sur les régimes régionaux d'évaporation, de ruissellement et de pluviosité. Cependant, même si ces changements d'affectation des terres peuvent avoir un impact local substantiel, dans la plupart des cas, leur impact net sur le climat planétaire risque peu d'être important.

■ ***Aérosols atmosphériques*** – Par ses activités agricoles et industrielles, l'homme injecte de grandes quantités de particules fines (aérosols) dans l'atmosphère. Bien qu'une grande partie de ces aérosols en soient rapidement extraits par la gravité et les précipitations, ils influent quand même sur le bilan radiatif de l'atmosphère. C'est la quantité et la nature des particules, ainsi que la nature des surfaces, terres ou océans, sous-jacentes, qui détermine si les aérosols viendront ajouter à l'effet de réchauffement ou le compenser. Leurs effets régionaux peuvent toutefois être très marqués. Des scientifiques ont avancé que des concentrations régionalement élevées de sulfates et de certains autres aérosols issus de la combustion de la biomasse ou de combustibles fossiles pouvaient dès maintenant réduire significativement le réchauffement solaire dans certaines régions du monde, en particulier dans l'hémisphère Nord. En effet, ces aérosols non seulement réfléchissent plus de rayonnement solaire directement vers l'espace, mais aussi augmentent les taux de condensation dans les nuages de l'étage inférieur, ce qui les rend plus réfléchissants. Il se pourrait que ces processus aient temporairement atténué le réchauffement de l'hémisphère qu'aurait causé l'amplification de l'effet de serre. Par contre, d'autres aérosols, et en particulier la suie, ont pu avoir l'effet inverse. Ainsi, bien que l'effet net des sulfates et autres aérosols à pouvoir refroidissant soit probablement significativement plus élevé que celui de la suie, ces effets demeurent encore mal compris, et sont difficiles à estimer avec confiance.

■ ***Brume arctique*** – Depuis les années 1940, les observateurs en poste dans l'Arctique signalent de plus en plus souvent la présence de couches de brume d'un brun rougeâtre. Cette brume, qu'on voit surtout en hiver et au printemps, lorsque l'air de l'Arctique est très froid et calme, est composée d'aérosols industriels, provenant surtout d'Europe et du nord de l'Asie, que les vents dominants ont transporté sur de grandes distances jusque dans la région. Ils contiennent des particules de suie et d'acides qui font monter l'absorption et la diffusion nettes du

rayonnement solaire printanier dans la basse atmosphère. Ils font aussi augmenter l'absorption par la surface du rayonnement solaire à mesure qu'ils se déposent sur la neige et la glace. Ces deux effets peuvent induire un léger réchauffement printanier dans l'Arctique et un changement des régimes des vents dans l'hémisphère.

■ ***Îlots thermiques urbains*** – Les milieux urbains sont très différents des paysages ruraux qu'ils remplacent. Les bâtiments et les véhicules libèrent de la chaleur directement dans l'atmosphère, et la pollution atmosphérique et les surfaces sombres des chaussées et des toits font augmenter l'absorption du rayonnement solaire. De plus, les constructions modifient la circulation du vent : en effet, le vent accélère entre les grands immeubles, mais peut devenir nul derrière eux. Le résultat net est que les grandes villes sont, en général, nettement plus chaudes que les campagnes avoisinantes, surtout en hiver. Au centre de Toronto, par exemple, il fait en moyenne environ 3 °C de plus qu'aux alentours. Il s'agit cependant d'un effet surtout local. Même additionnés, tous les effets d'îlot thermique urbain de la planète ne modifieraient pas significativement les conditions climatiques planétaires.

■ ***Détournement et stockage de l'eau*** – L'eau, quelle que soit sa forme (cours d'eau ou lacs), est une source d'humidité pour l'air situé au-dessus d'elle, et un important réservoir de stockage de chaleur. C'est ainsi que les plans d'eau aident à rafraîchir le climat local en été et à le réchauffer en hiver. Les projets à grande échelle visant à retenir ou à détourner l'écoulement de l'eau pourraient donc avoir une influence significative sur les climats régionaux.

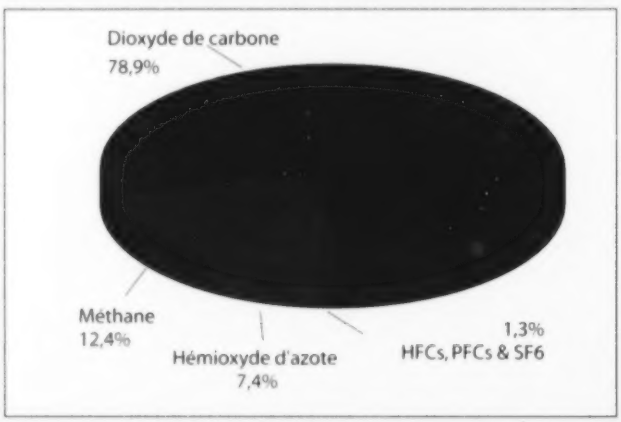
GAZ À EFFET DE SERRE : UNE COMPARAISON

Il est difficile de faire des comparaison exactes du pouvoir net de divers gaz à effet de serre en tant que forces intervenant dans le changement climatique, et le résultat dépend de la façon dont les comparaisons sont effectuées. Les meilleures estimations donnent cependant à penser que l'effet net sur le climat au cours du prochain siècle du rejet d'un gramme d'hémioxyde d'azote est presque 300 fois plus élevé que celui d'un gramme de dioxyde de carbone. Celui d'un gramme de méthane est environ 23 fois plus grand. Certains gaz, dont les concentrations sont encore très basses, sont infiniment plus puissants. Un gramme d'hexafluorure de soufre a environ 22 000 fois l'effet d'un gramme de dioxyde de carbone.

Pourtant, même si la force du dioxyde de carbone libéré dans l'atmosphère par les activités humaines est significativement moindre que celle de nombreux autres gaz à effet de serre, le volume tellement plus grand des émissions de ce gaz en fait le plus important facteur de l'influence de l'homme sur l'accentuation de l'effet de serre naturel. Par exemple, comme le montre la figure 2.7, la contribution projetée sur le prochain siècle du forçage imputable aux émissions canadiennes de dioxyde de carbone provenant des activités humaines en 2001 était environ six fois celle du méthane et dix fois celle de l'hémioxyde d'azote.

FIGURE 2.7

Contribution relative des émissions canadiennes de gaz à effet de serre de 2001 au réchauffement planétaire à venir



CHAPITRE 3

Prévoir le climat

Les grands changements climatiques impliquent nécessairement un risque de transformation radicale et relativement rapide des écosystèmes de la planète. Si cela devait se produire, la société humaine serait confrontée à des bouleversements physiques, sociaux et économiques qui pourraient atteindre, voire dépasser, tout ce que l'humanité a pu connaître jusqu'ici. Il serait alors prioritaire pour toutes les sociétés de se préparer et de réagir à ces défis; c'est pourquoi il faut absolument savoir quels pourraient être les changements, et quelles en seraient les conséquences. Toutefois, devant la complexité du système climatique de la Terre, on se demande s'il est possible de prédire avec une quelconque certitude à quels changements on peut raisonnablement s'attendre.

Malheureusement, les processus et interactions qui constituent le système climatique planétaire sont beaucoup trop vastes et complexes pour qu'on puisse les reproduire en laboratoire. L'étude des systèmes climatiques d'autres planètes, que ce soit Mars ou Vénus, n'est pas non plus d'une grande utilité, puisqu'ils ne comportent ni océans ni biosphères terrestres.

Les études du comportement passé du climat de la Terre peuvent fournir beaucoup d'informations sur l'évolution des climats passés et des indications de causes possibles de changement. Par contre, bien que les études observationnelles puissent éclairer certains des processus physiques en jeu dans le changement climatique, elles ne peuvent donner qu'un tableau très limité du fonctionnement du système climatique. Nous ne pouvons pas non plus simplement extrapoler les tendances et variations des climats récents et passés pour prédire le futur, surtout quand les forces intervenant dans les changements à venir peuvent être totalement différentes de celles du passé.

Heureusement, la plus grande partie des processus, interactions et changements détaillés qui prennent place dans notre système climatique peuvent être décrits en termes de lois physiques bien définies, comme les lois de la conservation de la masse et de l'énergie ou les lois du mouvement de Newton. Ces lois physiques peuvent être traduites en expressions mathématiques pour calculer, grâce à une informatique avancée, comment le système va répondre aux forces de changement.

Ces modèles mathématiques sont maintenant utilisés très couramment pour étudier les effets sur le climat de phénomènes actuels comme les éruptions volcaniques ou les anomalies de la température des océans. On s'en sert également pour tenter d'expliquer les événements climatiques passés et pour simuler les réactions possibles du système climatique aux interférences humaines, comme les changements d'affectation des terres et l'émission de gaz à effet de serre et d'aérosols.

LES MODÈLES MATHÉMATIQUES DU CLIMAT

Les limites des techniques mathématiques et des capacités informatiques rendent impossible de reproduire en détail tous les processus en jeu dans le système climatique, dont nombre ne sont pas encore bien mesurés ou compris. Les modélisateurs doivent donc les simplifier et les approximer, en posant des hypothèses sur ceux qui sont le plus importants et ceux qui sont le moins affectés par ces ajustements. On peut élaborer divers types de modèles, dont la nature dépendra de l'application recherchée, des simplifications requises et du degré de détail spatial et temporel nécessaire.

Un modèle extrêmement simple du climat serait un modèle du bilan énergétique à zéro dimension, qui ramène la température de la Terre à une moyenne planétaire en un point unique. Il pourrait être utilisé par exemple pour calculer la température moyenne à la surface de la Terre en fonction de l'équilibre énergétique découlant des propriétés de réflexion, d'absorption et de rayonnement de l'atmosphère et de la surface.

À l'autre bout de l'échelle, on trouve des modèles du système climatique (MSC) très sophistiqués, qui prennent en compte, dans un espace tri-dimensionnel et en fonction du temps, les

complexes interactions dynamiques qui interviennent dans l'atmosphère, les océans, la cryosphère, les surfaces des terres et la biosphère, et entre ces divers compartiments du système. Le cœur de ces modèles est constitué par des modèles de la circulation générale à couplage atmosphère-océan (MCGAO), dans lesquels des équations mathématiques qui représentent les lois de la physique concernant la conservation de la quantité de mouvement, de la masse, de l'humidité et de l'énergie permettent de simuler l'évolution de la dynamique et des flux d'énergie de la totalité du couple océan-atmosphère. Qui plus est, quelques versions avancées de ces modèles du système climatique incluent maintenant un module interactif et dynamique de la végétation, ainsi qu'un module réactif de la chimie de l'atmosphère. Elles peuvent explorer avec plus de détails comment les divers paramètres du climat – température, humidité, vitesse et direction du vent, humidité du sol et de nombreux autres – ont une chance d'évoluer avec le temps en n'importe quel point du globe, à mesure que diverses conditions seront modifiées et que les rétroactions entrent en jeu.

Entre l'un et les deux existe une grande diversité de modèles à une ou deux dimensions et des modèles plus détaillés des climats régionaux qui sont utilisés pour étudier divers processus et interactions climatiques à divers degrés de complexité. Ces modèles peuvent donner de très bons résultats dans l'étude de nombreuses relations climatiques à plus petite échelle, et aider à améliorer les équations utilisées dans les modèles couplés du climat ou à ajouter plus de détail aux sorties des MSC à l'échelle régionale.

Mais même le modèle du système climatique le plus complexe n'est en fait qu'une description grossière de la réalité. Malgré les dizaines de milliers de points de l'atmosphère et des océans pour lesquels le modèle effectue des calculs et les centaines de milliers de lignes de codage informatique utilisées à cette fin, ces simulations ne peuvent pas décrire totalement les caractéristiques et processus du climat dans le continuum spatio-temporel.

Un MSC type divise la surface de la Terre en une grille ou une série de mailles. Dans les premiers modèles de circulation générale, à faible résolution, les mailles étaient relativement grandes – chacune couvrant une superficie d'environ la taille du Manitoba. Aujourd'hui, certains modèles à haute résolution ont des mailles atmosphériques de moins de 60 000 kilomètres carrés – soit environ 20 % plus petites que le Nouveau-Brunswick – et des mailles océaniques encore plus petites. Sur la verticale, l'atmosphère est représentée par neuf à 30 couches, selon le modèle, et les océans peuvent en présenter jusqu'à 40.

Cependant, de nombreux importants processus climatiques prennent place à des échelles beaucoup plus petites que même les plus petites de ces mailles, et doivent être pris en compte collectivement plutôt qu'individuellement. Les valeurs attribuées à ces processus sont fixées au moyen d'une procédure dite « paramétrisation », qui fait intervenir le développement d'une relation physique et statistique entre les processus en question et des variables de grande échelle qui peuvent être calculées par le modèle. Les caractéristiques des nuages, l'évaporation, les précipitations et les caractéristiques de la surface des terres figurent parmi les processus qui doivent être paramétrisés. Les modèles doivent aussi inclure les complexes mécanismes de rétroaction qui existent entre les divers processus.

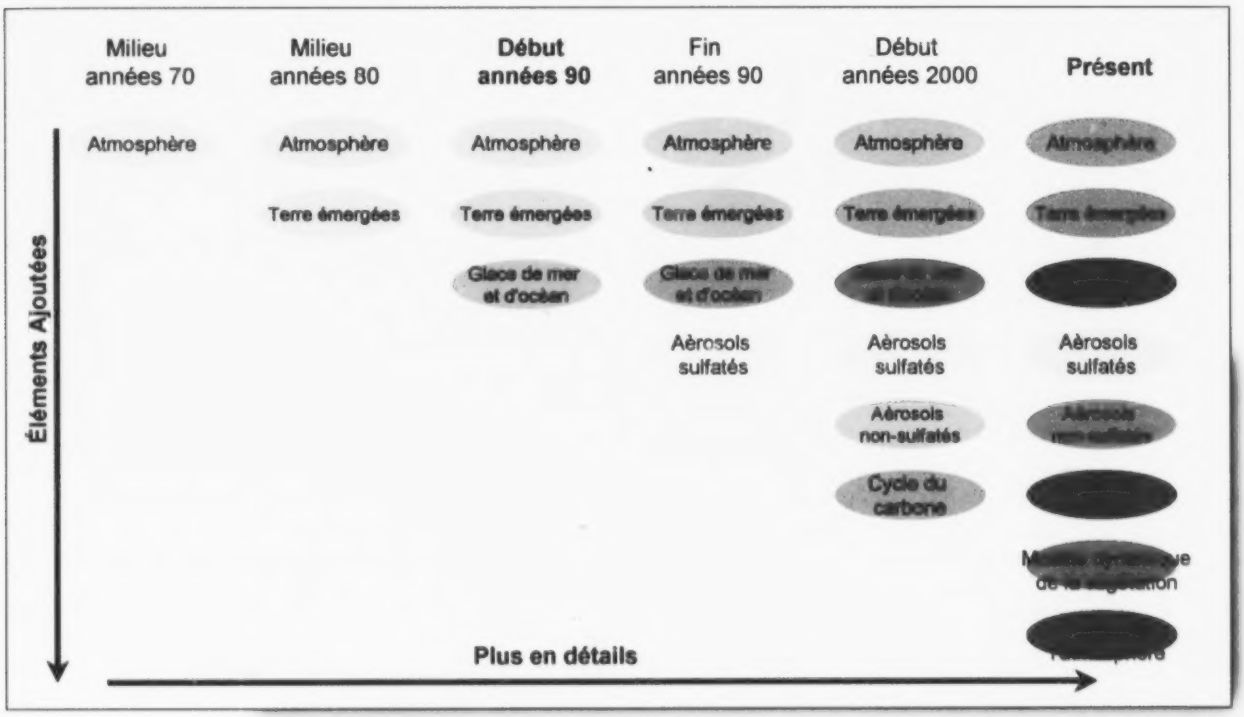
La figure 3.1 présente une chronologie simplifiée du développement des modèles du système climatique. L'incertitude sur la meilleure façon de décrire les processus en jeu dans et entre les divers composants est une des principales raisons des désaccords significatifs entre différents modèles quant aux conséquences d'un changement imposé au système et du fait que les résultats des expériences effectuées avec les modèles ne peuvent pas encore être utilisés comme des prédicteurs fiables des climats à venir.

La meilleure façon de savoir si un modèle peut vraiment simuler la réalité est en définitive de vérifier sa capacité à reproduire des changements qui sont déjà survenus. Par exemple, on peut l'utiliser pour simuler les conditions climatiques présentes et passées. Si les résultats de la simulation concordent bien avec les données d'observation, on a une meilleure confiance que le modèle pourra être utile pour simuler les climats à venir. La plupart des modèles du système climatique utilisés de nos jours pour les études du changement climatique peuvent raisonnablement bien simuler les climats passés et présents. Pourtant, bien que certains aient une meilleure performance que d'autres, aucun ne saurait être considéré comme très exact, surtout en ce qui concerne les climats régionaux.

Les expériences menées avec des modèles du système climatique nous ont permis de comprendre beaucoup mieux comment le climat pourrait évoluer. Mais cette connaissance est loin d'être complète, et nombre de questions sur les détails du

FIGURE 3.1

Évolution du développement des modèles du climat dans les 30 dernières années



Source : GTI - TRE du GIEC 2001.

changement climatique à venir n'ont pas encore trouvé réponse. Les scientifiques pensent qu'il faudra pour cela recourir à des ordinateurs beaucoup plus puissants que ceux qui ont été développés jusqu'ici et mieux comprendre certains des processus physiques du système climatique. Ces développement demanderont encore bien des années de recherches.

LES MODÉLISATIONS POUR L'AVENIR

Que nous enseignent les expériences des modèles du climat sur le genre de climat que pourrait créer l'amplification de l'effet de serre?

Un type courant d'expérience menée avec des modèles du climat dans la dernière décennie consiste à simuler comment le système climatique planétaire réagirait avec le temps à un changement graduel de la composition de l'atmosphère. Prenant pour point de départ un climat pré-industriel dans un état stable de quasi-équilibre, les modélisateurs appliquent d'abord les changements historiques des concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols pour simuler l'évolution du climat depuis une centaine d'années. Ils utilisent ensuite une ou plusieurs projections de l'évolution probable de la composition de l'atmosphère sous l'influence des émissions humaines de gaz à effet de serre et d'aérosols, pour créer des projections des climats futurs. Ce genre d'expérience a maintenant été fait à bien des reprises avec un certain nombre de modèles couplés du climat. Comme les résultats dépendent à la fois du type de modèle utilisé et des hypothèses quant aux changements futurs des facteurs naturels et humains influant sur le climat, les projections du changement probable du climat de la Terre ne concordent pas toujours d'un modèle à l'autre. Cependant, toutes convergent sur un certain nombre de points. Parmi les conclusions les plus fiables, les suivantes se détachent par leur importance :

- Au cours du prochain siècle, les températures planétaires moyennes en surface vont probablement monter d'au moins

Evolution du developpement des modeles du climat dans les 30 dernieres annees

LES MODÉLISATIONS POUR L'AVENIR

1 °C par rapport aux valeurs actuelles, et cette hausse pourrait dépasser 5 °C. Même à l'extrémité basse de cette plage, le taux projeté de réchauffement sera probablement sans précédent dans l'histoire de l'homme (figure 3.2).

- Le réchauffement en surface sera en général plus rapide et plus prononcé sur les terres que sur les océans. En hiver, les régions polaires se réchaufferont aussi beaucoup plus que les régions des basses latitudes.
- Les températures minimales nocturnes devraient monter plus rapidement que les maximums diurnes, ce qui réduirait l'amplitude thermique quotidienne.
- Une élévation de la température moyenne conduit à une hausse de la fréquence des température très élevées et à une baisse de celle des températures extrêmement basses.

Ces changements des régimes de température entraîneront aussi des modifications des régimes des vents et des courants océaniques. Un ralentissement, jugé probable, du recyclage des eaux superficielles et profondes de l'océan pourrait réduire l'advection de chaleur de l'équateur vers les pôles par l'océan; un effet en serait que certaines régions océaniques, comme l'Atlantique Nord et l'océan Austral, se réchaufferont moins, et que certaines parties de ces régions pourraient même connaître un refroidissement par rapport aux conditions actuelles.

- Il y aura un accroissement planétaire moyen de l'évaporation et des précipitations.
- Avec l'élévation des températures, l'étendue de la couverture de neige et de glace de mer dans l'hémisphère Nord sera réduite.

Il s'agit entre autres de la distribution des précipitations, puisque ce sont les trajectoires suivies par les tempêtes qui déterminent en majeure partie où il tombera de la pluie ou de la neige. Or, l'emplacement de ces trajectoires dépend des configurations de circulation atmosphérique, phénomènes complexes que les modèles du climat ne parviennent pas encore à simuler avec une exactitude suffisante. C'est pourquoi les prédictions des changements des trajectoires des perturbations et donc des régimes locaux de précipitation faites par les modèles ne sont pas très fiables. Il est cependant clair qu'il y aura des changements profonds de la distribution spatiale de la pluie et de la neige. Et, à mesure que les températures monteront et que certaines régions deviendront plus sèches et d'autres plus humides, on pourrait observer sur toute la planète des modification marquées des conditions climatiques qui régissent la croissance naturelle des végétaux.

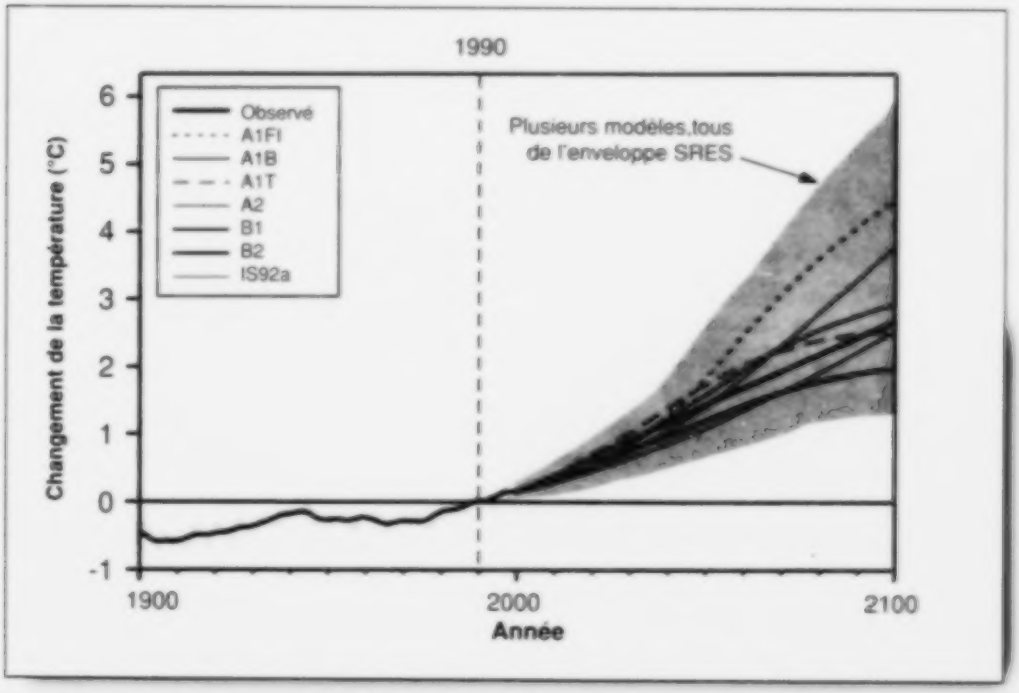


FIGURE 3.2

Projections par les modèles des changements futurs des températures

Source : Rapport de synthese - TRE du GIEC 2001

Un autre domaine d'incertitude significative est celui de la variabilité des conditions météorologiques et des nombreux types de phénomènes météorologiques extrêmes (tableau 3.1). Selon la plupart des études, les épisodes de précipitations extrêmes deviendront en moyenne plus fréquents. Pour certains modèles, il pourrait y avoir une augmentation des tempêtes intenses des latitudes moyennes; il n'y a toutefois pas d'accord général entre les diverses études sur ces caractéristiques des tempêtes. De même, certains résultats donnent à penser qu'on pourrait noter une hausse de la limite supérieure de l'intensité des tempêtes tropicales, mais il y a là encore peu d'accord sur l'évolution de l'intensité et de la fréquence moyennes de ces événements. Enfin, bien que certaines études du climat suggèrent que la hausse des températures pourrait s'accompagner d'une augmentation de fréquence de la foudre et de la grêle, ces phénomènes sont encore d'une échelle trop petite pour être résolus dans les modèles couplés du climat.

Bien que les modèles du système climatique donnent une assez bonne idée des effets des changements des concentrations atmosphériques de certains des principaux gaz à effet de serre et aérosols, il demeure un certain nombre de facteurs que la plupart ne prennent pas adéquatement en compte.

Par exemple, les projections modélisées du changement climatique à venir ne prennent généralement pas en compte les effets naturels des changements du rayonnement solaire ou ceux des aérosols que les éruptions volcaniques rejettent de temps à autre dans l'atmosphère. Ces facteurs influent pourtant sur le climat depuis les débuts de l'histoire de la Terre, et continueront à le faire jusqu'à la fin des temps. Dans certains cas, ils s'ajoutent aux effets de réchauffement de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre; dans d'autres, ils peuvent ralentir, voire renverser temporairement, le réchauffement par effet de serre prévu. Toutefois, ces changements naturels sont difficiles à prévoir. De plus, si l'on se base sur la variabilité du climat dans les deux derniers millénaires, il semble probable que ces forces naturelles ne vont pas modifier significativement la tendance à long terme vers un réchauffement du climat dû à la hausse des concentrations de gaz à effet de serre.

Certains facteurs de changement climatique dus aux activités humaines ne sont pas non plus adéquatement pris en considération dans les modélisations du climat. Les changements d'affectation des terres, outre leur impact sur les taux atmosphériques de dioxyde de carbone, peuvent modifier la quantité de rayonnement solaire réfléchi par la surface de la Terre. Certains avancent qu'ils ont pu jouer un rôle important dans le réchauffement survenu jusqu'ici. De même, très peu d'études menées avec des modèles ont pris en compte l'effet des aérosols sombres (comme la suie), qui peuvent contribuer au réchauffement de la planète. La présence de polluants atmosphériques dans l'Arctique et les détournements d'eau à grande échelle peuvent aussi avoir des effets climatiques locaux qui, dans certains cas, se répercutent à l'échelle planétaire. Les meilleures estimations scientifiques indiquent cependant que, au cours du prochain siècle, les changements subis par le climat de la Terre seront dominés par l'amplification de l'effet de serre.

TABLEAU 3.1

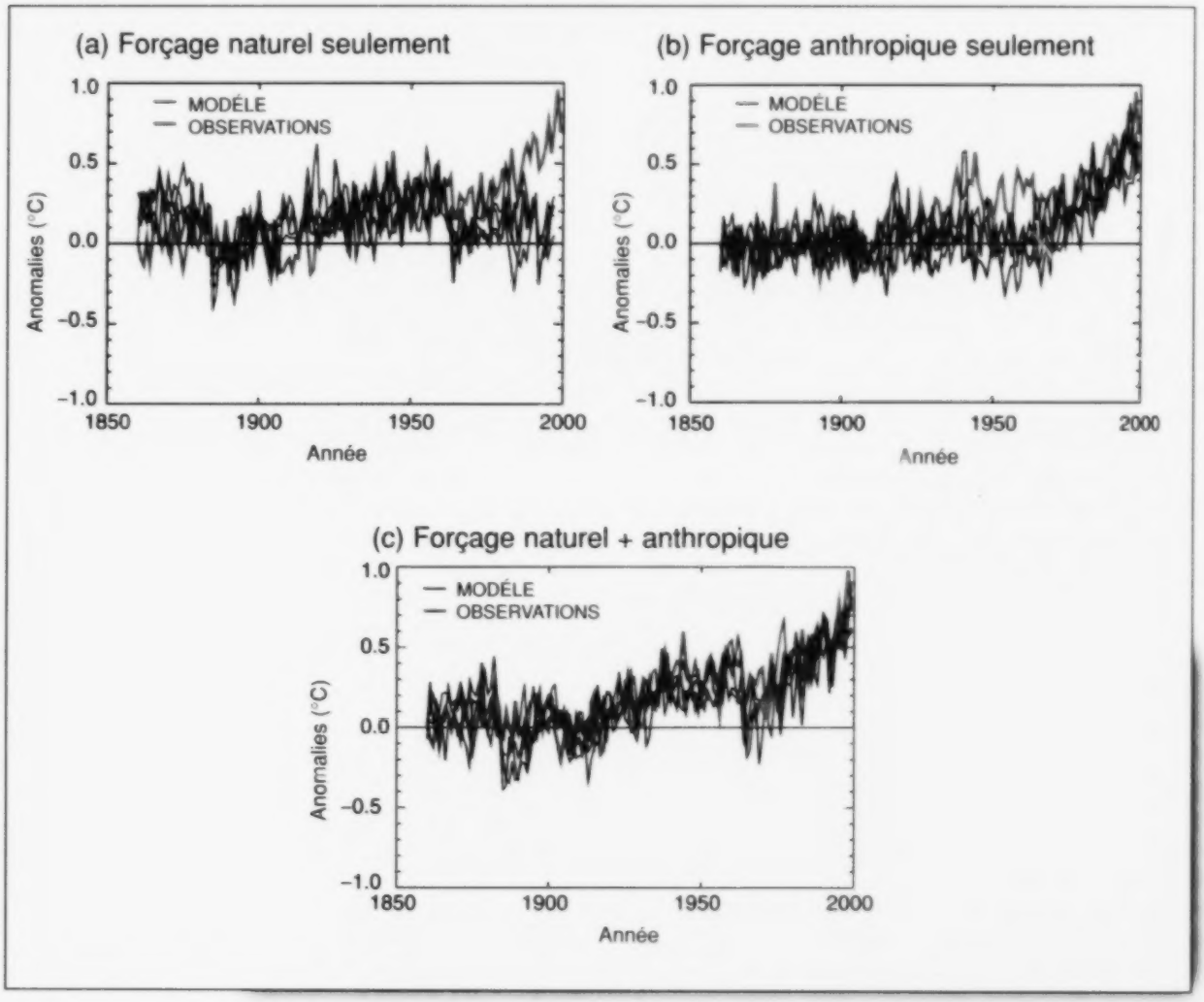
Degré de confiance dans les changements projetés des événements climatiques extrêmes

Changements dans le phénomène climatique	Confiance dans les projections
Températures maximales plus élevées et davantage de jours chauds sur la presque totalité des terres émergées	Très probable
Températures minimales plus basses, moins de jours froids sur la presque totalité des terres émergées	Très probable
Réduction de l'amplitude quotidienne de la température sur la plus grande partie des terres émergées	Très probable
Augmentation de l'inconfort dû aux effets combinés de la chaleur et de l'humidité	Très probable, dans la plupart des régions
Plus d'épisodes de précipitations intenses	Très probable, dans de nombreuses régions
Augmentation des sécheresses en été sur les continents	Probable, dans la plupart des régions de l'intérieur des continents aux latitudes moyennes
Augmentation de la vitesse des vents maximums dans les cyclones tropicaux	Probable, dans certaines régions
Augmentation de l'intensité des précipitations moyennes et maximales dans les cyclones tropicaux	Probable, dans certaines régions

Source : GTI - TRE du GIEC 2001.

FIGURE 3.3

Comparaison des tendances modélisées de la température planétaire depuis 1860 avec les valeurs observées



Source : GTI - TRE du GIEC 2001.

L'HOMME EST-IL RESPONSABLE DU RÉCHAUFFEMENT DE LA TERRE?

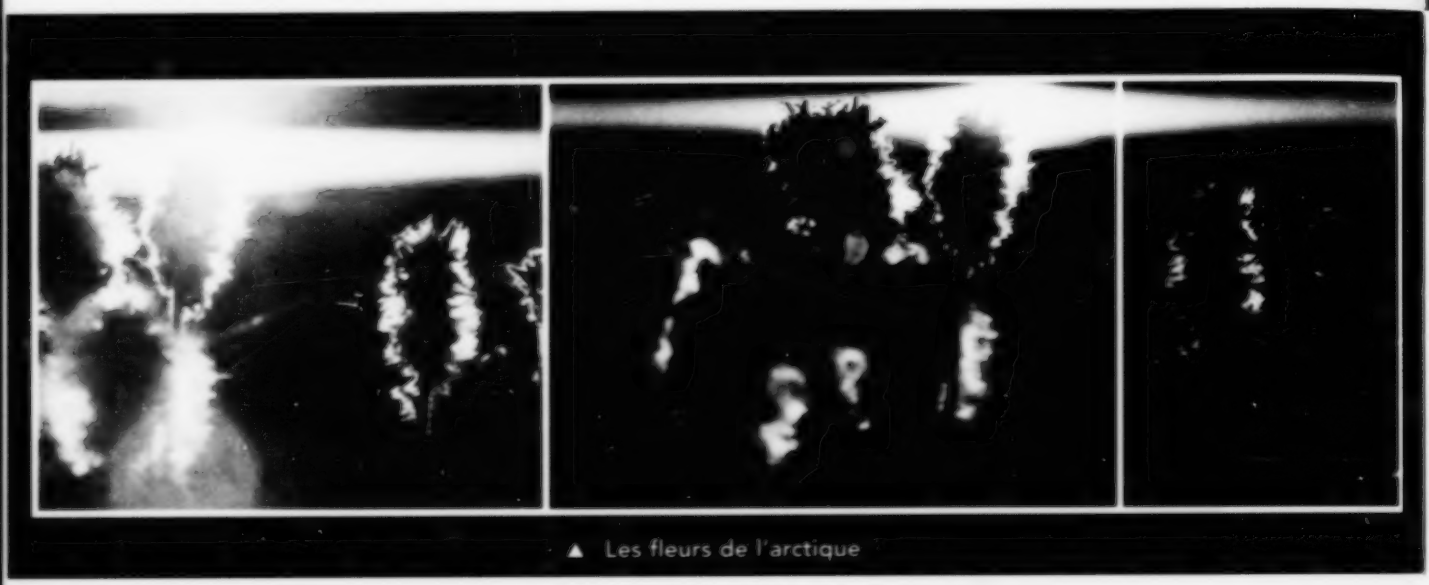
Comme on l'a vu au chapitre 1 (figure 1.8), la température moyenne de la surface de la Terre a monté d'environ 0,6 °C au cours du dernier siècle. Jusqu'à quel point ce réchauffement est-il inhabituel, et pouvons-nous attribuer à des causes précises les changements observés?

Les enregistrements paléoclimatiques (figure 1.5) suggèrent que les températures planétaires moyennes en surface des dernières décennies n'ont pas eu de précédent depuis au moins 2000 ans. En outre, les expériences menées avec des modèles du climat donnent aussi à penser qu'un réchauffement de 0,6 °C en un siècle a peu de chances d'être dû à la variabilité interne du système climatique. Ces résultats de recherche indiquent que le réchauffement du dernier siècle est très inhabituel, et peu

probablement imputable à de seules causes naturelles. Quoi qu'il en soit, ces données en elles-mêmes ne nous aident pas à comprendre la cause des récentes tendances du climat.

Les experts ont pour cela recours à des études statistiques complexes et à des modèles du climat. Même si ces études ne sauraient prendre en compte le rôle de tous les facteurs possibles, elles peuvent, isolément et en combinaison, examiner comment les changements passés des facteurs clés ont pu modifier le climat et comparer les résultats aux changements observés. Les expériences ainsi menées utilisent divers combinaisons de forçages dus aux éruptions volcaniques, aux changements de l'irradiance solaire, aux augmentations des concentrations de gaz à effet de serre, aux récents changements de l'ozone stratosphérique et/ou aux variations des concentrations d'aérosols sulfatés, pour déterminer lesquelles des combinaisons correspondent le mieux aux changements observés.

Les résultats de ces études indiquent que le réchauffement survenu au début de XX^{e} siècle est probablement dû à la combinaison d'une augmentation de l'intensité de l'énergie solaire incidente, d'une baisse graduelle de la quantité de matière volcanique flottant dans l'atmosphère et d'une lente augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre. Par contre, depuis 1950, la charge moyenne de matière volcanique dans l'atmosphère a à nouveau augmenté, alors que l'intensité du rayonnement solaire a oscillé autour d'une valeur moyenne relativement constante. Ces facteurs naturels, qui auraient dû causer un refroidissement, ne peuvent donc pas expliquer la récente tendance au réchauffement (figure 3.3a). Par contraste, l'augmentation rapide de l'influence de l'homme sur le système climatique, surtout celle de la hausse des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre, a eu un très fort effet de réchauffement (figure 3.3b). C'est pourquoi les experts concluent que la plus grande partie du réchauffement observé ces 50 dernières années est probablement attribuable aux activités humaines.



▲ Les fleurs de l'arctique

Source : Brent Colpitts

CHAPITRE 4

Une planète plus chaude

Pour chaque espèce vivante, il existe un ensemble de seuils climatiques et autres délimitant les conditions dans lesquelles elle prospère et celles où elle stagne ou disparaît. Selon la température de l'air et du sol, le type, la quantité et la variabilité des précipitations, la force du vent, l'ensoleillement et d'autres facteurs climatiques, c'est telle ou telle espèce qui pourra occuper une région donnée. L'influence du climat sur la survie se révèle clairement dans la spécificité et la variété des nombreuses régions de végétation de la planète – que l'on pense à la toundra, aux forêts boréales, aux prairies et aux forêts tropicales humides. Chacune de ces régions peut être considérée comme une entité écologique distincte – une écozone – dont les caractéristiques ont été modelées en grande partie par un écoclimat unique à la région et essentiel aux organismes qui y vivent.

Si les climats locaux et régionaux changent, et c'est souvent arrivé par le passé, les limites des écozones changent elles aussi, et les écosystèmes doivent s'y ajuster. Les espèces dont les besoins climatiques ne correspondent plus à ceux de la région doivent migrer ou disparaître, et d'autres espèces, autrefois inconnues dans la région, commencent à s'y installer. Le changement climatique est un stimulus de migration, tant pour les végétaux que pour les animaux. S'il est graduel, il ne s'accompagne en général que de perturbations minimales. S'il est rapide, la transformation peut être dramatique et entraîner des extinctions d'espèces.

Les sociétés humaines, comme les écosystèmes naturels, sont harmonisées aux caractéristiques de leurs climats régionaux. Notre comportement et nos tolérances, nos cultures et nos économies et, en particulier, notre régime alimentaire sont des conséquences du climat. Par le passé, alors que les fluctuations du climat s'étalaient sur une période assez longue, les gens ont appris à réagir et à s'adapter. Dans certains cas, cette adaptation a été le moteur du développement social et technologique. Dans d'autres, les populations qui n'ont pas pu s'adapter ont été confrontées à l'adversité,voire à la catastrophe.

Même si nous pouvons tirer de précieux enseignements de la façon dont les écosystèmes et les sociétés humaines ont par le passé réagi aux variations du climat, l'histoire ne fournit pas nécessairement d'orientation fiable face aux effets du changement climatique à venir. En effet, aussi bien l'ampleur que la vitesse des changements de la température planétaire moyenne pourraient, dans les prochaines décennies, dépasser tout ce que l'humanité a connu depuis au moins 10 000 ans. Quelles indications avons-nous alors de l'impact possible de changements aussi profonds et rapides sur les écosystèmes naturels et les sociétés humaines?

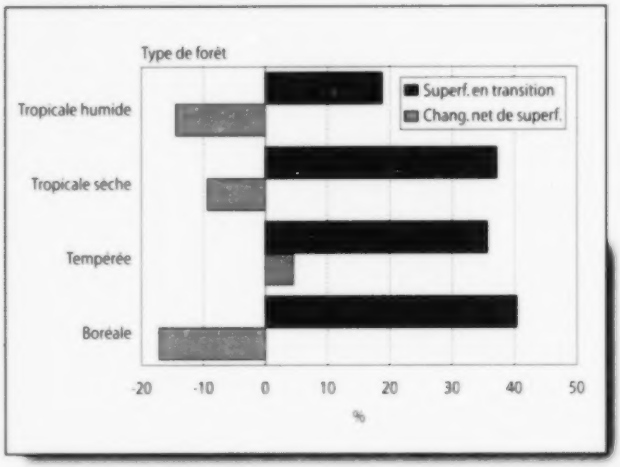
Les projections des modèles du climat sont certes encore trop entachées d'incertitude pour nous aider à prédire avec précision les effets régionaux sur la végétation ou les menaces pour la santé et le bien-être des hommes. Elles fournissent quand même une base sur laquelle construire des scénarios plausibles qui pourront être utilisés pour évaluer les sensibilités de la nature et des sociétés à la gamme des changements auxquels on peut s'attendre. Qui plus est, s'ils disposent de meilleurs modèles dynamiques de la végétation qui puissent être couplés aux modèles du climat, les chercheurs peuvent explorer les modalités complexes de la réponse possible des écosystèmes aux changements du climat. Eclairés par les recherches sur les effets des changements climatiques passés, les scientifiques peuvent maintenant offrir des indices importants quant à ceux des écosystèmes et des secteurs de la société qui sont le plus résilients ou le moins sensibles à ces changements. Bien que ces résultats doivent encore être utilisés avec prudence, ils présentent cependant un certain nombre de conclusions, provisoires mais importantes, sur les implications du changement climatique tant pour l'homme que pour l'écologie.

LES ÉCOSYSTÈMES TERRESTRES NATURELS

Sur les terres, c'est probablement les écosystèmes non gérés, et en particulier les forêts, qui seront le plus touchés par le réchauffement du climat. D'ici à ce que les écosystèmes se soient pleinement adaptés aux changements de climat projetés

FIGURE 4.1

Changements projetés, en pourcentage, de l'étendue planétaire des divers types d'écosystèmes forestiers dans une réponse à l'équilibre à un scénario standard de 2 x CO_2



pour le prochain siècle, environ un tiers des forêts de la planète auront connu des changements majeurs de leur composition en espèces. Les changements les plus marqués se produiront probablement aux latitudes élevées, et les moindres sous les tropiques. Nombre des espèces touchées pourraient réagir au changement en migrant, mais certaines pourraient disparaître. Certaines régions verront probablement une diminution de la biomasse des écosystèmes. Cependant, en moyenne planétaire, la productivité biologique va probablement augmenter.

L'ajustement total des écosystèmes aux nouvelles températures pourrait quand même être très perturbateur, et montrer un retard de nombreux siècles. En effet, la vitesse de migration de nombreuses espèces végétales est d'un ordre de grandeur plus basse que la vitesse prévue du changement climatique à venir. Par exemple, aux latitudes moyennes, une élévation prévue de la température de l'ordre de 1 à 3,5 °C sur une cinquantaine d'années entraînerait un décalage des régimes climatiques de quelque 150 à 550 km vers le pôle (ou, en montagne, de 150 à 550 m vers le sommet). En comparaison, la plupart des arbres migrent à raison de 4 à 200 km/siècle, selon l'espèce. Ainsi, tant que les écosystèmes n'auront pas atteint un équilibre avec le nouveau climat, un bon nombre de leurs éléments (et en particulier sur leur bordure chaude), n'étant plus adaptés au climat dominant, seront soumis à des stress et donc plus vulnérables aux ravages des maladies, des insectes et des feux. Certaines espèces alors vont stagner et disparaître, et d'autres bénéficieront du changement. La composition en espèces des écosystèmes va donc changer. En général, la hausse des températures sera le plus stressante pour les espèces qui sont déjà proches de la limite chaude de leur plage de tolérance thermique et le plus bénéfique pour celles qui sont proches de sa limite froide. D'un autre côté, un climat plus chaud sera propice à des épisodes plus fréquents d'infestations ou d'épidémies destructrices et pourrait sérieusement affecter les conditions d'humidité du sol. La réponse des écosystèmes naturels sera donc complexe et variera dans le temps et l'espace.

Le réchauffement et le changement de la pluviométrie auront aussi des impacts majeurs sur les écosystèmes aquatiques. Aux latitudes nord, le raccourcissement de la saison avec couverture de glace rallongera d'autant la saison de production biologique active, mais les eaux profondes des lacs seront davantage affectées par des conditions anoxiques en été. La répartition des espèces de poisson sera modifiée, à cause d'une perte significative d'habitat pour les espèces d'eaux froides et d'un gain pour les espèces d'eaux chaudes. Dans de nombreuses régions, la réduction de l'apport d'eau et le réchauffement contribueront à exacerber les problèmes environnementaux existants, comme l'eutrophisation, l'acidification et l'augmentation du rayonnement UV-B. La répartition et les caractéristiques des milieux humides de l'intérieur varieront elles aussi en réponse aux changements des nappes phréatiques locales et à la fonte du pergélisol.

Grâce à leur mobilité, la plupart des espèces fauniques seront physiquement mieux en mesure que les plantes de migrer en réponse au changement de climat. Selon des observations récentes, par exemple, de nombreuses espèces animales ont déjà réagi par la migration aux changements du climat survenus depuis quelques dizaines d'années. Cependant, un grand nombre d'entre elles dépendent aussi beaucoup de l'habitat et des sources de nourriture, qui vont probablement migrer à des vitesses différentes. Ces différences de vitesse de migration peuvent démanteler les écosystèmes, et être particulièrement nocives pour les espèces déjà soumises à des stress d'ordre climatique et autre. Le nombre d'espèces menacées d'extinction pourrait donc croître significativement.

LES ÉCOSYSTÈMES AGRICOLES

Selon les régions, la combinaison de l'accroissement des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone et du

changement climatique aura des effets variés sur la production alimentaire. En effet, les rendements des cultures dépendent des interactions complexes des diverses espèces végétales avec les propriétés du sol et les éléments nutritifs disponibles, les ravageurs et maladies, la qualité et la température de l'air, et les conditions d'humidité.

Le dioxyde de carbone est un facteur important, car il constitue une source esssentielle de nourriture pour les végétaux. Des expériences menées en serre indiquent que, pour de nombreuses plantes, la concentration atmosphérique actuelle de dioxyde de carbone est un facteur limitant de la croissance. Une augmentation de cette concentration pourrait donc stimuler leur croissance et leur rendement. Elle aurait certes un impact minime sur le taux de croissance et le rendement de cultures comme le maïs et la canne à sucre, mais pourrait avoir un effet positif significatif pour des céréales importantes comme le blé et le riz. D'un autre côté, une pénurie d'éléments nutritifs dans le sol, la pollution de l'air et l'exposition accrue aux UV-B pourrait limiter, ou du moins limiter, ces avantages. De plus, de nombreuses plantes indésirables pourraient elles aussi pousser plus rapidement dans des concentrations de CO_2 plus élevées.

D'autre part, les impacts des changements du climat sur la productivité agricole dépendent des changements à la fois des températures et de la disponibilité de l'eau, et bien entendu de leurs extrêmes.

Dans les régions des latitudes et altitudes plus élevées, où les températures sont relativement basses, les rendements des récoltes pourraient s'améliorer significativement avec des hivers plus doux et des saisons de croissance plus chaudes et plus longues. Et pourtant, même dans ces régions, ces avantages pourraient être plus qu'atténués par d'autres stress, comme des périodes plus fréquentes et plus longues de grande chaleur et de sécheresse ou les effets d'épisodes de pluie plus intenses et des inondations qui les accompagnent. De même, les élevages de bestiaux et de volailles pourraient être affectés par un changement de l'accès aux ressources en eau et/ou une augmentation de l'exposition au stress thermique. De toute la planète, c'est cependant les tropiques qui seront probablement le plus vulnérables aux perturbations du climat. En effet, la distribution des pluies y est déjà très variable, aussi bien dans le temps que dans l'espace. Certaines régions se prêtent déjà à peine à la production agricole, et sont très sensibles à des changements même mineurs de l'occurrence des précipitations. Les études du climat suggèrent que, même dans les régions qui recevront plus de pluie, une grande partie de cette augmentation sera sous la forme de pluies plus intenses, ce qui augmente les risques d'érosion et d'inondations, et vient s'ajouter à d'autres facteurs qui entraînent déjà une dégradation de la qualité des sols agricoles et de l'eau. De plus, le réchauffement fera probablement croître tant l'évaporation en surface et le stress thermique imposé à de nombreuses espèces végétales, ce qui en abaissera le rendement.

Changer les pratiques de gestion agricole – comme de modifier les dates de plantation, les taux de fertilisation, les modes d'irrigation et le choix des espèces végétales et animales – peut aider à tirer profit de certains des avantages et à réduire les effets nocifs qui pourraient accompagner le changement climatique. Certains experts avancent que, tant que le réchauffement au cours du prochain siècle ne dépassera pas quelques degrés Celsius, ces mesures d'adaptation vont probablement aider à accroître la production alimentaire nette aux latitudes moyennes. Cependant, c'est déjà aussi la région où se situent la majorité des pays les plus riches du monde. Par contraste, même des taux modérés de réchauffement causeraient probablement des réductions significatives de la production alimentaire dans bien des régions tropicales et sèches. Même si la production alimentaire ne doit subir qu'un changement mondial net faible, les inégalités de sa distribution sur la planète deviendront probablement encore plus marquées.

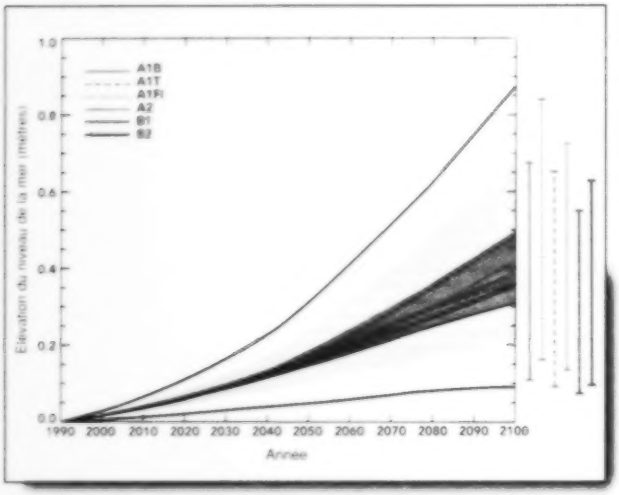
Si l'élévation planétaire moyenne des températures au cours du prochain siècle devait dépasser 2 à 3 °C, il est probable qu'aucune mesure d'adaptation ne parviendra à en absorber les conséquences, et que la plupart des régions du monde connaîtront une baisse de la production alimentaire. L'augmentation du coût de la nourriture ainsi déclenchée ferait tout probablement croître significativement le nombre de personnes sur la planète qui risquent de souffrir de la faim.

LES RÉGIONS CÔTIÈRES

Depuis une centaine d'années, les niveaux moyens des mers de la planète montent lentement, à raison de 1,5 cm tous les 10 ans. Bien qu'on ne dispose pas d'indication que ce taux ait accéléré depuis 1900, la situation pourrait changer bientôt. Au cours du prochain siècle, l'élévation du niveau marin va probablement se situer entre 1 et 9 cm/décennie, selon le taux de hausse des températures planétaires et la vitesse à laquelle les océans et les inlandsis répondront au réchauffement

FIGURE 4.2

Projection de l'élévation du niveau de la mer pour divers scénarios d'émissions de gaz à effet de serre



Source : GTI – TRE du GIEC 2001

(figure 4.2). Les principales raisons de l'élevation prevue d'ici 100 ans sont la dilatation de l'eau de mer qui se réchauffe et la fonte des glaciers dans le monde entier. Mais, les océans ne se réchauffant que très lentement, les niveaux marins vont continuer de s'élever pendant des siècles encore, même si les températures à la surface de la Terre cessent de monter.

Depuis une centaine d'années, les niveaux moyens des mers de la planète montent lentement, à raison de 1,5 cm tous les 10 ans. Bien qu'on ne dispose pas d'indication que ce taux ait accéléré depuis 1900, la situation pourrait changer bientôt. Au cours du prochain siècle, l'élevation du niveau marin va probablement se situer entre 1 et 9 cm/décennie, selon le taux de hausse des températures planétaires et la vitesse à laquelle les océans et les inlandsis repondront au réchauffement (figure 4.2). Les principales raisons de l'élevation prevue d'ici 100 ans sont la dilatation de l'eau de mer qui se réchauffe et la fonte des glaciers dans le monde entier. Mais, les océans ne se réchauffant que très lentement, les niveaux marins vont continuer de s'élever pendant des siècles encore, même si les températures à la surface de la Terre cessent de monter.

Le réchauffement des océans, des changements de la fréquence et de l'intensité des tempêtes et des modifications de la circulation océanique affecteraient eux aussi gravement les écosystèmes côtiers, menaçant par exemple la santé des récifs de coraux et altérant la répartition des populations de poissons. De nombreux récifs coralliens sont déjà à leurs seuils de tolérance thermique, ou à proximité, et une forte élévation de la température accompagnée d'une baisse des taux de formation du carbonate de calcium due à l'accroissement des concentrations atmosphériques de CO_2 pourrait créer des environnements de moins en moins favorables pour ces récifs et les précieux habitats marins qu'ils abritent.

Les sociétés humaines sont elles aussi très vulnérables aux changements survenant sur les côtes. Les régions côtières de la planète abritent en effet près du quart de l'humanité; elles sont déjà soumises à de grandes pressions du fait de l'accélération de la croissance démographique, de la pollution, des détournements d'eau en amont, de l'inondation et de l'érosion des littoraux. Environ 70 % des plages de la planète sont en train de reculer. Un grand nombre de récifs coralliens ont souffert ces dernières années de graves épisodes de blanchissement, probablement dus à des périodes très chaudes liées au couplage d'épisodes El Niños avec d'autres stress environnementaux locaux imputables à l'homme. Dans de nombreuses régions, les mangroves et les marais tidaux ne peuvent pas répondre assez vite aux effets d'une montée rapide du niveau marin pour survivre. Comme ce sont ces écosystème qui protègent les côtes contre les dommages des tempêtes, leur effondrement aggraverait d'autant la vulnérabilité de l'infrastructure et des écosystèmes côtiers à ces dommages. Les régions deltaïques, aux populations humaines souvent importantes, seraient particulièrement vulnérables à l'inondation et à l'érosion, qui entraîneraient en outre une perte significative de terres agricoles.

De nombreux pays pourront se protéger quelque peu de ces impacts en construisant des ouvrages de défense comme des digues de mer ou autres barrières. Mais ces mesures seraient coûteuses. Au Japon, par exemple, les mesures de protection contre les impacts d'une élévation de 50 cm du niveau marin coûteraient près de 2 milliards de dollars US par an. Une protection similaire pour les côtes des États-Unis aurait un coût cumulatif sur le prochain siècle de 20 à 150 milliards de dollars US. Les Pays-Bas et le Royaume-Uni, déjà protégés contre la mer par des infrastructures finement ajustées aux besoins, devraient investir des milliards de dollars de plus pour contrer les effets de hausses semblables du niveau de la mer.

Cependant, les effets les plus prononcés de la montée du niveau des mers toucheront les pays dont les côtes basses sont à peu

près impossibles à défendre, ou qui n'ont pas les ressources nécessaires pour se protéger. À mesure que la mer avancera et que les ondes de tempête gagneront de nouvelles hauteurs, ces pays risquent de subir de graves pertes de territoire, de biens et de vies. Des nations comme les Maldives, guirlande d'îles de l'océan Indien dont le point culminant est situé à environ six mètres au-dessus du niveau actuel de la mer, pourraient disparaître de la carte; d'autres, comme l'Égypte, le Bangladesh et le Vietnam, dont une grande partie de la population vit sur les basses terres de deltas, pourraient perdre une importante fraction de leur territoire habitable.

En termes humains, le coût de l'élévation du niveau marin serait immense. Même si des mesures de défense sont prises face à certaines de ces menaces côtières, il a été estimé qu'une élévation du niveau marin de 40 cm ferait croître d'environ 80 millions le nombre de personnes victimes chaque année dans le monde d'inondations dues à des tempêtes côtières.

LES AUTRES IMPACTS

Les impacts du changement climatique sur les écosystèmes naturels et agricoles et sur les régions côtières auront sans aucun doute certains des plus grands effets directs sur la biosphère et sur l'humanité, mais ils auront aussi d'autres importantes conséquences, dont les suivantes :

- changements dans la quantité et la qualité de l'eau douce. Selon la plupart des projections du changement climatique, le débit et l'approvisionnement en eau devraient baisser dans nombre de régions des tropiques et des latitudes moyennes, et généralement augmenter dans la plupart des régions des latitudes élevées. D'ici 2080, jusqu'à 3 milliards des gens vivant dans des régions déjà soumises à un stress hydrique connaîtront une réduction supplémentaire de l'approvisionnement en eau. L'élévation de la température se traduira en général par une baisse de la qualité de l'eau s'il n'y a pas une augmentation des apports pour la compenser;
- les régions des latitudes élevées seront moins hostiles et plus accessibles, à mesure que les hivers deviendront plus doux et que la glace de mer reculera vers le pôle;
- aux latitudes moyennes, augmentation des problèmes liés aux maladies et insectes tropicaux qui migreront avec le réchauffement du climat. La santé des humains et des végétaux en sera affectée;
- intensification ou, dans certains cas, atténuation des stress imposés par d'autres sources de pollution sur l'homme et sur les écosystèmes;
- augmentation du stress dû à la chaleur pour l'homme;
- augmentation de l'instabilité du terrain et des dommages aux infrastructures dans les régions des latitudes élevées à mesure que le pergélisol dégèlera.

LES IMPLICATIONS POUR LA SÉCURITÉ MONDIALE

L'altération de la productivité agricole, la rareté croissante de l'eau douce, les impacts de l'élévation du niveau marin et d'autres conséquences directes du changement climatique pourront aussi déclencher un certain nombre d'effets secondaires dangereux, dont le plus inquiétant est peut-être leurs implications pour la sécurité économique et politique dans le monde entier.

L'accès à l'abri, à la nourriture et à l'eau est le plus fondamental de tous les besoins humains. Nous ne savons pas encore avec certitude quel sera l'effet net du changement climatique à venir sur les ressources planétaires en nourriture et en eau. Il pourrait être négligeable; il pourrait même être positif. Mais il est presque certain que la distribution régionale de ces biens de première nécessité va changer considérablement, et aggraver les incertitudes actuelles en matière de sécurité alimentaire et d'hygiène publique. De plus, les ravages de l'ennoyement accru des côtes dû à la montée du niveau marin, des inondations dues aux épisodes de précipitations plus intenses et des sécheresses découlant de plus longues périodes de pluviosité insuffisante pourraient entraîner le déplacement de vastes populations. Ces effets seront particulièrement marqués dans les régions les plus pauvres du globe, qui ont le moins les moyens de remédier aux déficiences des approvisionnements en nourriture et en eau ou d'accueillir les personnes déplacées.

De plus, des changements significatifs de l'environnement, surtout s'ils s'accompagnent de grandes catastrophes humanitaires, constitueront de graves obstacles au développement économique et social durable des régions affectées.

Par le passé, ces pénuries et ces effets ont conduit à des conflits armés et à des migrations massives. Cela pourrait encore être le cas. Qui plus est, l'expérience récente a montré que les famines, inondations et autres crises d'origine environnementale nécessitent à tout le moins d'importants transferts de fonds d'aide aux pays qui en ont été victimes.

Dans une société planétaire de plus en plus interconnectée, le problème d'une nation devient inévitablement celui de toutes les nations.

SOURCES MONDIALES DE PRÉOCCUPATION

Nombre de gens sont d'avis que nous ne devrions pas laisser le changement climatique à venir dépasser des niveaux ou des taux qui seraient « dangereux » pour l'homme ou pour les écosystèmes. Cependant, le danger est une fonction à la fois du degré de gravité éventuelle des impacts du changement climatique et de l'acceptabilité de cette gravité. Décider de ce qui est ou non dangereux est donc un jugement de valeur qui ne peut pas être réglé par la science à elle seule. Les scientifiques ont préféré s'attacher à identifier un certain nombre de « sources de préoccupation » et à déterminer comment ces sources de préoccupation peuvent croître à mesure qu'augmentent l'ampleur ou la vitesse du changement climatique. À l'échelle planétaire, cinq grandes sources de préoccupation ont été identifiées :

- La perte irréparable d'écosystèmes uniques et menacés. Il s'agit entre autres des glaciers tropicaux, des récifs coralliens, des mangroves et des « points chauds » de la biodiversité. Ces écosystèmes ne sont généralement présents que dans d'étroites zones géographiques et sont très sensibles au changement climatique. Nombre d'entre eux seront gravements affectés par une élévation même minime de la température. De plus, leur dégradation ou leur disparition pourraient avoir des effets qui s'étendent bien au-delà des régions où ils sont situés. Plus important ou plus rapide sera le changement du climat, plus grands seront le nombre de systèmes en péril et les dommages susceptibles de se produire.
- Une distribution inéquitable des impacts. Les pays en développement ont tendance à être plus vulnérables au changement climatique que les pays industrialisés, et les gens pauvres plus que les riches. Par exemple, alors qu'une petite hausse de la température semble représenter un avantage net pour nombre de pays industrialisés, elle causerait des dommages nets dans beaucoup de pays en développement. En général, le changement climatique va probablement aussi exacerber les inégalités dans et entre les pays. Les élévations rapides ou importantes de la température affecteront la plupart des pays, mais encore plus les pays pauvres.
- Les impacts planétaires nets deviendront graduellement négatifs à mesure que le changement de la température planétaire s'accroîtra. Selon certains experts, si les changements de la température sont faibles, les avantages économiques nets à l'échelle de la planète peuvent être plus grands que les dommages nets. Cependant, comme la majorité de la population vit dans des pays en développement, c'est déjà la majorité des êtres humains qui subiraient des effets négatifs. Pour des élévations moyennes à importantes, les impacts économiques nets vont probablement devenir extrêmement négatifs.
- L'élévation des températures devrait faire croître les risques découlant des phénomènes météorologiques extrêmes. Il s'agirait par exemple d'inondations, de sécheresses, de tempêtes tropicales ou autres, de températures extrêmement élevées et de feux irréprimés. Si le changement planétaire de la température devient trop grand, on risque de plus en plus de dépasser les seuils naturels ou critères de conception critiques menant à l'effondrement des infrastructures et donc à la catastrophe.
- Les surprises climatiques de grande échelle. Il est très peu probable que les climats subissent un changement brutal, comme une interruption brusque du Gulf Stream dans l'Atlantique Nord ou l'effondrement de l'inlandsis de l'Antarctique de l'Ouest, tant que les changements de la température planétaire restent faibles. Cependant, de grands changements du climat pourrait faire dépasser les seuils critiques qui limitent ces risques. Ces surprises climatiques de grande échelle seraient absolument désastreuses.

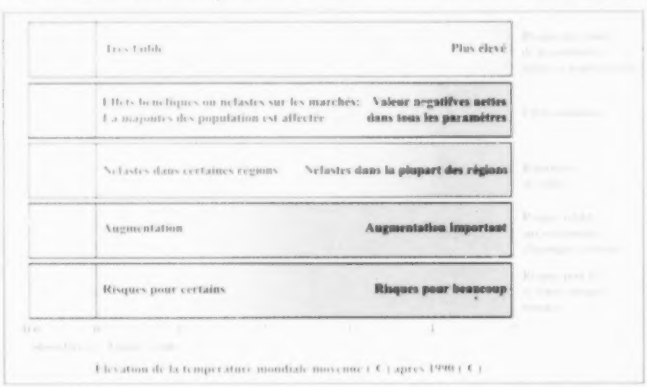


FIGURE 4.3

Sources mondiales de préoccupation s'accroissent avec l'ampleur des élévations de température

Source : GTII – TRE du GEIC 2001

SOURCES MONDIALES DE PRÉOCCUPATION

Nombre de gens sont d'avis que nous ne devrions pas laisser le changement climatique à venir dépasser des niveaux ou des taux qui seraient « dangereux » pour l'homme ou pour les écosystèmes. Cependant, le danger est une fonction à la fois du degré de gravité éventuelle des impacts du changement climatique et de l'acceptabilité de cette gravité. Décider de ce qui est ou non dangereux est donc un jugement de valeur qui ne peut pas être réglé par la science à elle seule. Les scientifiques ont préféré s'attacher à identifier un certain nombre de « sources de préoccupation » et à déterminer comment ces sources de préoccupation peuvent croître à mesure qu'augmentent l'ampleur ou la vitesse du changement climatique. À l'échelle planétaire, cinq grandes sources de préoccupation ont été identifiées :

- La perte irréparable d'écosystèmes uniques et menacés. Il s'agit entre autres des glaciers tropicaux, des récifs coralliens, des mangroves et des « points chauds » de la biodiversité. Ces écosystèmes ne sont généralement présents que dans d'étroites zones géographiques et sont très sensibles au changement climatique. Nombre d'entre eux seront gravements affectés par une élévation même minime de la température. De plus, leur dégradation ou leur disparition pourraient avoir des effets qui s'étendent bien au-delà des régions où ils sont situés. Plus important ou plus rapide sera le changement du climat, plus grands seront le nombre de systèmes en péril et les dommages susceptibles de se produire.
- Une distribution inéquitable des impacts. Les pays en développement ont tendance à être plus vulnérables au changement climatique que les pays industrialisés, et les gens pauvres plus que les riches. Par exemple, alors qu'une petite hausse de la température semble représenter un avantage net pour nombre de pays industrialisés, elle causerait des dommages nets dans beaucoup de pays en développement. En général, le changement climatique va probablement aussi exacerber les inéqualités dans et entre les pays. Les élévations rapides ou importantes de la température affecteront la plupart des pays, mais encore plus les pays pauvres.
- Les impacts planétaires nets deviendront graduellement négatifs à mesure que le changement de la température planétaire s'accroîtra. Selon certains experts, si les changements de la température sont faibles, les avantages économiques nets à l'échelle de la planète peuvent être plus grands que les dommages nets. Cependant, comme la majorité de la population vit dans des pays en développement, c'est déjà la majorité des êtres humains qui subiraient des effets négatifs. Pour des élévations moyennes à importantes, les impacts économiques nets vont probablement devenir extrêmement négatifs.
- L'élévation des températures devrait faire croître les risques découlant des phénomènes météorologiques extrêmes. Il s'agirait par exemple d'inondations, de sécheresses, de tempêtes tropicales ou autres, de températures extrêmement élevées et de feux irréprimés. Si le changement planétaire de la température devient trop grand, on risque de plus en plus de dépasser les seuils naturels ou critères de conception critiques menant à l'effondrement des infrastructures et donc à la catastrophe.
- Les surprises climatiques de grande échelle. Il est très peu probable que les climats subissent un changement brutal, comme une interruption brusque du Gulf Stream dans l'Atlantique Nord ou l'effondrement de l'inlandsis de l'Antarctique de l'Ouest, tant que les changements de la température planétaire restent faibles. Cependant, de grands changements du climat pourrait faire dépasser les seuils critiques qui limitent ces risques. Ces surprises climatiques de grande échelle seraient absolument désastreuses.

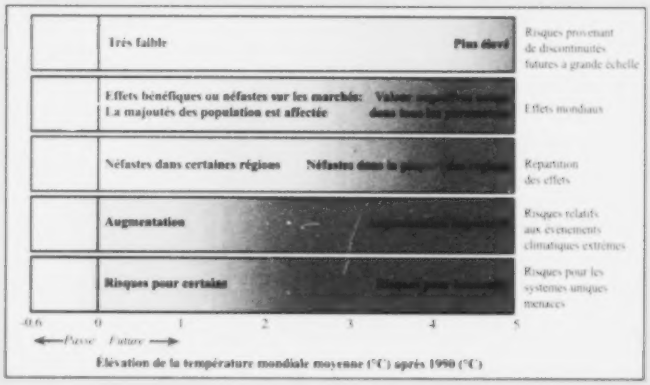


FIGURE 4.3

Sources mondiales de préoccupation s'accroissent avec l'ampleur des élévations de température

Source : GTII – TRE du GEIC 2001.

CHAPITRE 5

Un Canada plus chaud

Un grand nombre de chercheurs canadiens issus d'un vaste éventail de disciplines scientifiques étudient actuellement les effets environnementaux, sociaux et économiques que pourrait avoir le changement climatique au Canada. Les résultats de leurs recherches sont mis en commun par l'intermédiaire de programmes tels que le Réseau canadien de recherche sur les impacts du climat et l'adaptation (C-CIARN), ce qui permettra de dresser des tableaux plus complets de la façon dont les changements à venir de notre climat et de nos conditions météorologiques pourront modifier nos écosystèmes, notre économie et notre société – région par région et secteur par secteur. Ces études constituent aussi l'importante contribution du Canada à des évaluations internationales des incidences du changement climatique sur la planète dans son ensemble. L'information présentée dans ce chapitre est largement fondée sur des résultats issus d'études récentes.

LES FORÊTS

Environ 45 % de la masse terrestre du Canada est couverte d'arbres, que ce soient les épinettes noires et les bouleaux des forêts boréales froides ou les résineux et feuillus des latitudes sud, plus chaudes et plus humides. Dans les deux régions qui restent non boisées, la situation est due en partie à des raisons climatiques : dans les plaines des Prairies, la faible humidité du sol et, dans la toundra nordique, les basses températures.

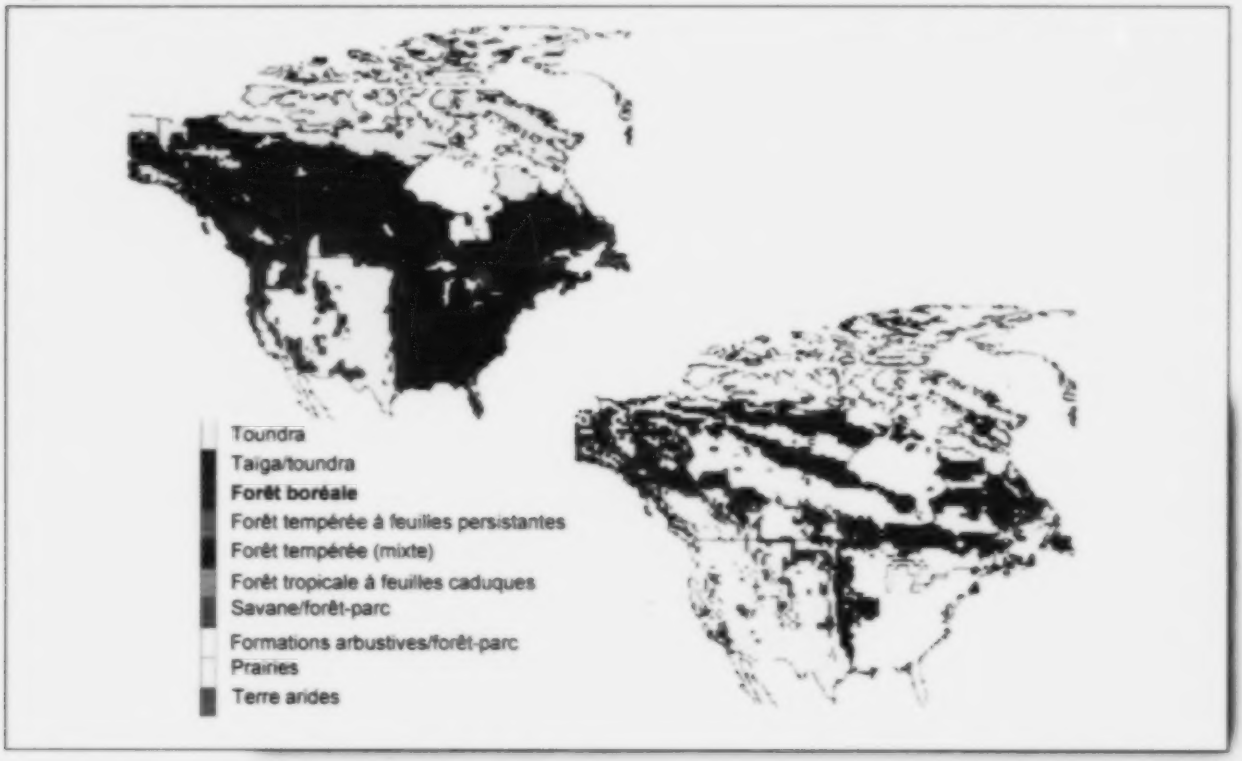
Devant l'étendue de cette ressource, on comprend que la foresterie soit la plus grosse industrie du Canada. Les entreprises engagées dans la récolte et la transformation des produits y génèrent des revenus dépassant 45 milliards de dollars et plus de 360 000 emplois directs. L'industrie touristique liée à la forêt apporte pour plusieurs milliards de dollars de bénéfices supplémentaires. De plus, les forêts ont une importance écologique non négligeable. Elles fournissent des habitats vitaux aux espèces sauvages, modulent fortement les processus hydrologiques et radiatifs du système climatique, freinent l'érosion des sols et constituent une fraction importante du réservoir planétaire de carbone « vivant ». C'est pourquoi leur santé future est essentielle non seulement au bien-être économique du Canada, mais aussi au fonctionnement des processus fondamentaux de la biosphère.

Des changements même mineurs de la température et des précipitations peuvent influer significativement sur la croissance des arbres. Par exemple, le simple réchauffement de 1 °C survenu au cours du dernier siècle a déjà entraîné un allongement marqué des saisons de croissance et fait augmenter la croissance des végétaux aux latitudes moyennes et élevées du Canada. Les peupliers faux-trembles du centre de l'Alberta fleurissent maintenant trois semaines plus tôt qu'il y a 100 ans. Les modèles projetant des élévations de température de quelque 2 à 6 °C et des changements de la pluviométrie sur une grande partie du Canada pour les 50 prochaines années, on peut s'attendre à ce que les impacts sur ses forêts soient beaucoup plus grands dans les décennies à venir. L'impact net sur la biosphère et sur les Canadiens dépendra d'un grand nombre d'autres facteurs biophysiques et socio-économiques, et variera donc considérablement d'une région à l'autre. Il pourrait être positif dans une région et négatif dans une autre, et entraîner avec le temps un lent décalage des limites des divers types de forêts. Une fois que les forêts auront fini de réagir à ces changements, processus qui pourrait prendre des siècles, la répartition des écozones au Canada aura probablement été radicalement modifiée (figure 5.1). Ces décalages devraient faire substantiellement diminuer la superficie totale du Canada qui est couverte de forêts, la majorité des pertes étant dues à l'expansion des prairies vers le nord et l'est, en même temps que les températures s'élèvent et que l'humidité disponible dans le sol baisse dans l'intérieur du continent nord-américain.

Ce sont les régions présentement couvertes de forêts boréales qui connaîtraient les plus grands changements. Sur leurs lisières sud, l'épinette noire, essence dominante, céderait graduellement la place aux prairies et aux essences à feuilles persistantes et à feuilles caduques des forêts tempérées de région fraîche. En même temps, sur leurs lisières nord, il y aura une certaine expansion vers le nord de la forêt boréale sur les régions de toundra, mais elle serait considérablement retardée par la

FIGURE 5.1

Changements potentiels des limites des forêts et des prairies en Amérique du Nord résultant d'un climat typique à doublement du CO_2. Le graphique du côté supérieur gauche montre une végétation typique pour les conditions courantes climatiques tandis que le graphique à droite montre que les endroits de la nouvelle végétation sont placés sur une double simulation du dioxyde de carbone. Les endroits où il n'y a pas de changement de la végétation restent de couleur blanche.



Source: Adapté de Bachelet et Neilson 2000.

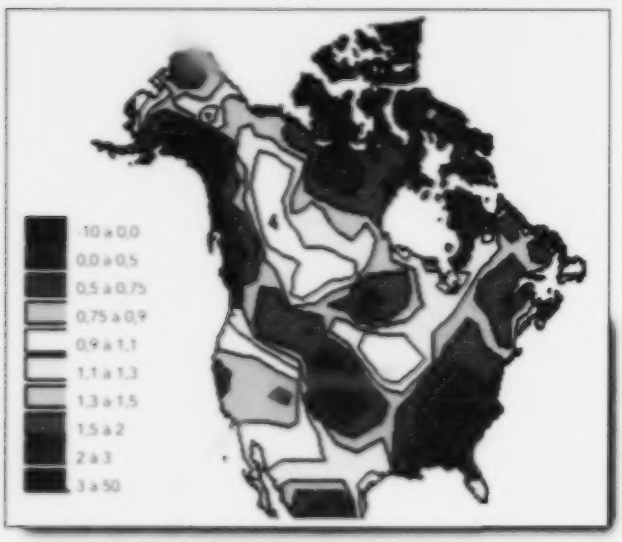
dégradation relativement lente du pergélisol sous-jacent et par la piètre qualité des sols dans de nombreuses parties du paysage de toundra.

L'effet net des changements projetés du climat pourrait à terme rendre l'écosystème forestier canadien plus productif qu'il ne l'est aujourd'hui. Dans les forêts du Québec, par exemple, les effets combinés d'une augmentation des teneurs en dioxyde de carbone, de températures plus élevées et de conditions plus humides pourraient aider à faire monter la croissance forestière moyenne de quelque 50 à 100 % d'ici 2050. Par contre, dans de nombreuses régions, le processus de changement sera probablement très perturbateur. En effet, la majorité des essences canadiennes peuvent migrer à raison de 700 m ou moins par an, alors que les températures qui déterminent la plage dans laquelle prospère chaque essence peuvent se décaler d'une centaine de kilomètres par degré Celsius de réchauffement. Le long des bordures chaudes des écosystèmes, un grand nombre des végétaux se retrouvent donc dans des conditions climatiques peu propices à une croissance saine. C'est en particulier le cas aux marges des écosystèmes et aux zones seuils. Comme ces régions vulnérables sont plus sujettes à des stress sporadiques causés par des maladies, des infestations d'insectes et des feux de friche, leur passage d'un type forestier à un autre sera lui aussi sporadique, et souvent brutal. Les conséquences de cet état de choses sur les fonctions assurées par les écosystèmes forestiers pour la biosphère et pour les Canadiens peuvent être gravement négatives.

Les forêts du Canada sont par ailleurs vulnérables à d'autres stress qui, superposés à celui du changement climatique, peuvent aggraver considérablement ces impacts négatifs. En particulier, dans l'est du Canada, l'augmentation du rayonnement ultraviolet, la pollution par l'ozone troposphérique, les pluies acides et le lessivage des substances chimiques du sol sont autant de facteurs susceptibles de nuire aux arbres. Les dépérissements de peuplements de bouleaux et d'érables déjà survenus en Ontario et au Québec peuvent être symptomatique de ce genre de stress. De plus, des climats plus doux risquent d'être rapidement accompagnés d'une augmentation des infestation d'insectes et de maladies, lorsque des insectes et des virus autrefois inconnus dans nos forêts migreront vers le nord et que les espèces aujourd'hui présentes deviendront plus virulentes. L'accumulation plus rapide de biomasse morte causée par ces stress va de plus exacerber les effets des étés plus secs et des impacts de foudre plus nombreux, ce qui se traduira par une augmentation de la fréquence et de la gravité des feux de forêt. Ces changements se remarquent d'ailleurs déjà dans certaines régions du Canada. Pendant les années chaudes et sèches connues depuis le début des années 1980, les infestations de dendroctone du pin ponderosa dans l'ouest du Canada ont

FIGURE 5.2

Changements projetés du risque de feux de forêt en 2100 par rapport à l'époque actuelle, calculés en tant que rapport des indices saisonniers de gravité des incendies (basé sur des simulations du climat réalisées à l'aide du MCCG)



Source : Service canadien des forêts.

montre une augmentation spectaculaire. En 2001 seulement, quelque 18,6 millions d'hectares de ces forêts ont été défoliés par des insectes. Ces effets directs et indirects du changement climatique ont contribué à une énorme augmentation de la perte nette de forêts canadiennes imputable aux feux irréprimés. En 2002, par exemple, environ 2,8 millions d'hectares de forêts ont été ravagés par le feu au Canada. Les experts s'entendent pour dire que, dans la plupart des régions du Canada, ces pertes vont augmenter à mesure que les température s'élèveront (figure 5.2).

Par contre, même si cette destruction du couvert forestier va au départ injecter de grandes quantités supplémentaires de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et à terme amplifier le réchauffement déjà survenu, la repousse dans les régions affectées va, pendant de nombreuses dizaines d'années, absorber lentement une grande partie de ce carbone.

L'AGRICULTURE

En 1998, l'industrie agricole et agro-alimentaire du Canada a généré environ 95 milliards de dollars de revenus intérieurs et a été le troisième employeur en importance. Pourtant, malgré l'importance de l'agriculture pour la population, le potentiel agricole du Canada est limité, entre autres par son climat froid. Avec une saison de croissance sans gel ne dépassant par 200 jours dans l'extrême sud et quelques semaines dans l'extrême nord, les sols du Canada restent inactifs une grande partie de l'année. De plus, des hivers rigoureux peuvent endommager même la végétation en dormance, ce qui réduit la possibilité de pratiquer des cultures d'hiver, comme le blé d'automne, dans les Prairies et autres régions semblablement touchées. Une fois arrivée la saison de croissance, les taux de croissance des végétaux au Canada sont encore limités par la quantité d'énergie thermique disponible pendant la saison. Il s'agit là d'importants facteurs limitatifs des types de cultures qui peuvent être pratiquées au Canada, ainsi que des rendements et du nombre possible de récoltes par année.

Il semblerait donc qu'un réchauffement serait bénéfique pour l'agriculture du Canada. Par exemple, dans les scénarios typiques pour l'année 2050, les saisons de croissance aux alentours de Whitehorse et Yellowknife seraient comparables à celles observées aujourd'hui à Edmonton, et les conditions au Nouveau-Brunswick à celles de la presqu'île de Niagara. Tout le Canada jouirait ainsi de conditions favorables à la culture de végétaux à rendement plus élevé et demandant des saisons de

croissance plus longues et plus chaudes, à un accroissement de la polyculture dans le sud, et à l'expansion vers le nord de l'agriculture marginale. Le maïs-grain pourrait devenir une culture importante dans des régions comme le Manitoba et le nord de l'Ontario, le blé d'hiver être cultivé dans les Prairies, et les vignobles et vergers de pommes être très productifs au Québec. Les effets directs d'une teneur plus élevée en dioxyde de carbone comme fertilisant des plantes pourraient venir s'ajouter à ces avantages.

Cependant, la production agricole est par ailleurs très sensible aux changements et aux extrêmes des conditions météorologiques et climatiques. De nombreuses cultures sont par exemple sensibles au stress de la chaleur, surtout aux stades clés du développement, et pourraient être affectées par l'augmentation de la fréquence et de la gravité des vagues de chaleur estivales. De plus, les projections des régimes et caractéristiques des précipitations d'été donnent à penser que la durée et la gravité des périodes de sécheresse pourraient augmenter de façon significative dans bien des régions des latitudes moyennes de l'hémisphère Nord. La hausse des températures accélérera aussi le rythme auquel la végétation et les sols rejettent de l'eau dans l'atmosphère, ce qui réduit l'humidité disponible dans le sol. Par contre, quand il y aura de la pluie, on s'attend à ce qu'elle soit plus intense, ce qui accroîtra les risques de périodes d'excès d'humidité dans le sol, d'inondations régionales, et donc de pertes de sol dues à l'érosion hydrique. En fait, la plupart des grands désastres qui frappent chaque année les cultures sont dus à de tels extrêmes de température et d'humidité du sol. Ainsi, les événements survenus récemment dans les Prairies canadiennes, comme les sécheresses consécutives de 2000 à 2003, ou l'année très humide observée dans de nombreux endroits de la région en 2004, bien que n'étant pas sans précédent dans l'histoire du climat du Canada, sont à de nombreux égards d'excellentes illustrations de conditions qui pourraient revenir plus souvent dans les décennies à venir.

Les autres facteurs influant sur la production agricole ne resteront pas constants ou non restrictifs. En premier lieu, il y a au Canada relativement peu de sols qui se prêtent à l'agriculture. À l'heure actuelle, seulement environ 10 millions d'hectares d'éventuelles terres agricoles y sont inutilisés pour des raisons de climat, et il s'agit pour la plupart de terres marginales ne convenant pas à la production céréalière. Certaines de ces terres portent des peuplements forestiers de grande valeur. La possibilité d'étendre l'agriculture sur ses marges nordiques n'est donc pas très grande. Ensuite, les insectes, les ravageurs et les maladies des plantes réagissent très rapidement aux variations du climat, ce qui accentue considérablement la probabilité de graves infestations dans les décennies à venir.

LES RESSOURCES EN EAU

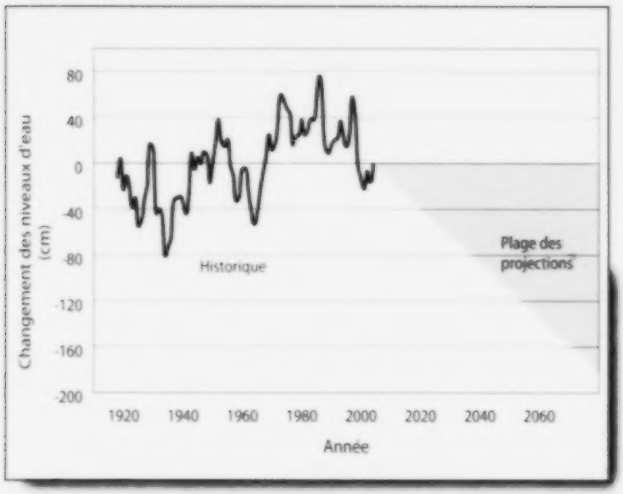
Les eaux douces du Canada sont une ressource extrêmement précieuse considérée par beaucoup de gens comme très abondante, renouvelable et relativement propre. Elles sont stockées sous forme liquide dans des cours d'eau, des lacs, des sols et des aquifères, ainsi que dans la végétation; elles sont aussi présentes sous forme solide dans la glace des glaciers, dans le couvert nival, dans la glace de lacs et de cours d'eau et dans le pergélisol. Leur présence est essentielle au maintien de la vie, et très importante pour un grand nombre d'activités économiques et de secteurs de la société. Selon certaines estimations, leur contribution à l'économie canadienne peut dépasser 20 milliards de dollars par an. Leur surabondance peut pourtant entraîner des inondations catastrophiques, causant des dommages aux écosystèmes et au tissu social. Par ailleurs, malgré son abondance au Canada, cette ressource précieuse est actuellement soumise à des pressions découlant d'exig[illegible]ces humaines croissantes et souvent opposées. De plus, elle est particulièrement vulnérable aux impacts des changements et de la variabilité du climat.

Les modèles du climat projettent que, dans les prochaines décennies, les ressources en eau deviendront plus abondantes dans une grande partie du Nord canadien, et que l'eau présente sous la forme de neige et de glace sera graduellement remplacée par de l'eau sous forme liquide. Les débits hivernaux des cours d'eau devraient donc augmenter sur une bonne partie du territoire canadien, les crues printanières survenir plus tôt et le ruissellement et les pointes de débit d'eau de fonte être moins prononcées. Par contre, la lente dégradation du pergélisol va aussi faire changer l'hydrologie des eaux souterraines dans le nord, modifier les écoulements et abattre les obstacles naturels qui régissent actuellement une grande partie des régimes régionaux de drainage.

Par contraste, dans le sud du Canada, l'abondance de l'eau en été va probablement baisser, et devenir plus variable. Diverses études donnent à penser que la combinaison d'une augmentation de l'évaporation des eaux de surface dans un climat plus chaud et d'une modification des régimes

FIGURE 5.3

Projections de divers modèles des changements à venir du niveau de l'eau dans le lac Érié, par rapport aux changements survenus depuis 1920



pluviométriques entraînera probablement une augmentation de la fréquence, de la gravité et de la durée des sécheresses estivales dans l'intérieur du sud du pays. Ces sécheresses, à leur tour, induiront des périodes de très bas débits et niveaux d'eau des lacs, et d'appauvrissement des ressources en eau souterraine. Pour les grands réservoirs, cet état de choses devrait conduire à des baisses persistantes des niveaux moyens. Par exemple, dans certains des Grands Lacs, qui ensemble alimentent en eau douce quelque 45 millions de personnes, la baisse des niveaux d'eau pourrait atteindre un mètre, voire plus, dans les 50 à 75 prochaines années.

Ce genre de périodes prononcées de pénurie d'eau auront des impacts majeurs sur la production d'hydroélectricité, le transport maritime, l'irrigation agricole, les loisirs aquatiques, l'approvisionnement en eau des municipalités, et diverses autres utilisations socio-économiques. Dans l'ouest du Canada, elles seront exacerbées par la disparition graduelle des glaciers alpins qui, actuellement, fournissent en été une grande partie de l'alimentation en eau douce des cours d'eau de la région. On verra un accroissement de la concurrence pour l'utilisation de l'eau et des pressions politiques en vue de transferts d'eau entre bassins hydrographiques. En outre, les sécheresses graves feront augmenter la dégradation de la qualité de l'eau, le risque d'eutrophisation et les dommages généralisés aux écosystèmes aquatiques.

Ironiquement, alors que les inondations printanières dues à la fonte rapide de la neige pourraient devenir moins fréquentes, les inondations d'été risquent de devenir plus intenses et plus fréquentes, de même que les dommages qu'elles entraînent. En effet, le réchauffement des étés va probablement faire augmenter l'intensité des épisodes de pluie, quand il y en aura. Par exemple, des études canadiennes donnent à penser que, d'ici 2080, un épisode de pluie estivale extrême qui revient présentement tous les 40 ans pourrait avoir une période de récurrence de seulement dix ans. Lorsque les précipitations sont intenses, il pénètre moins d'eau dans le sol pour recharger les eaux souterraines et il en ruisselle plus dans les cours d'eau, les milieux humides et les lacs. Ce ruissellement peut certes aider à recharger les réservoirs de surface épuisés par la sécheresse, mais il peut aussi accentuer l'érosion du sol et entraîner des inondations estivales beaucoup plus catastrophiques.

LES PÊCHES

Le Canada étant doté d'un très long littoral et de nombreux lacs d'eau douce, la pêche commerciale et sportive constitue un volet important de son économie, à laquelle elle contribue pour plus de 10 milliards de dollars chaque année. Qui plus est, pour nombre de Canadiens, surtout les résidents des collectivités autochtones et des petites collectivités côtières, la pêche est un mode de vie et un élément de la culture. On voit donc l'importance de la santé des ressources halieutiques dans les eaux intérieures du Canada et dans les eaux adjacentes.

Cependant, la santé de la plupart des espèces de poissons repose sur un ensemble précis mais complexe de conditions d'environnement et d'habitat dans lesquelles elles prospèrent et au-delà desquelles elles déclinent, voire disparaissent. Parmi ces conditions figurent un certain nombre de facteurs climatiques, comme la température de l'air et de l'eau, et les régimes des précipitations et des vents. La santé, la productivité et la répartition des poissons sont donc sensibles aux changements du climat. Dans une région donnée, certaines espèces seront en meilleure santé et plus abondantes, d'autres dépériront et pourraient même disparaître complètement, et des espèces exotiques pourraient envahir et à terme dominer le territoire. On a d'ailleurs de bonnes indications que des changements de ce genre sont déjà en train de prendre place. Par exemple, le changement climatique semble être un important facteur dans la baisse des stocks de saumon au large de la Colombie-Britannique, alors que l'on a observé des saumons rouges et roses dans l'Arctique, bien au-delà de leur aire de répartition

connue. On pense également que, dans l'Atlantique, les récentes élévations des températures de l'eau ont contribué à un déclin de la limande.

La relation entre le climat et les ressources halieutiques est complexe, et fait intervenir tant les effets directs sur chaque espèce que les effets indirects par l'entremise des changements d'abondance des sources de nourriture et des prédateurs. Certains espèces, comme les salmonidés, dépendent en outre des changements dans les habitats d'eau douce et d'eau salée. En outre, les ressources halieutiques sont touchées par d'autres grands facteurs étrangers au climat, dont en particulier la pollution et la mauvaise gestion des ressources imputables à l'homme. Bien que ces interconnexions soient encore mal comprises, on peut déjà faire quelques projections utiles. Par exemple, les projections de températures de l'eau plus élevées et d'une occurrence plus fréquente de bas débits dans les cours d'eau donnent à penser qu'on observera un accroissement de la mortalité chez les salmonidés remontant les cours d'eau pour frayer. De même, des crues soudaines plus fréquentes pourraient endommager les lits de gravier utilisés pour la fraye. D'un autre côté, ces effets pourraient être compensés par une baisse de mortalité des juvéniles gagnant la mer. Les changements du climat de l'océan peuvent aussi influer sur la répartition et l'importance de certaines maladies marines, comme la maladie de l'huître, et sur les risques de proliférations d'algues toxiques. Dans l'Arctique, la présence de plus grandes superficies d'eau libre pourra faire croître les sources de nourriture et donc l'abondance de nombreuses espèces de poissons, mais menacer la morue polaire et altérer les pratiques de pêche traditionnelle dans le nord à cause des changements de la couverture de glace de mer.

Dans les lacs et cours d'eau, des températures plus élevées seraient généralement bénéfiques pour les poissons d'eaux chaudes, comme l'achigan et l'esturgeon, mais faire baisser l'abondance des espèces d'eaux froides, comme la truite et la ouananiche. On peut s'attendre à ce que des espèces exotiques qui prospèrent dans des eaux plus chaudes migrent dans ces lacs et y entrent en compétition avec les espèces actuelles, dont certaines pourraient disparaître complètement. La baisse des niveaux d'eau mettrait en péril les milieux humides côtiers, qui fournissent d'importants habitats du poisson, et entraîner une dégradation de la qualité de l'eau. Par contre, un raccourcissement de la saison de couvert glaciel ferait baisser la mortalité des poissons au cours de l'hiver.

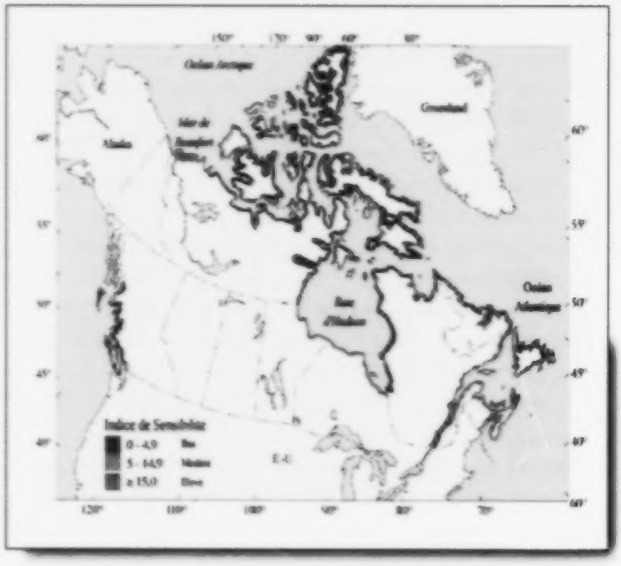
LES ZONES CÔTIÈRES

Le littoral océanique du Canada, qui s'étend sur plus de 240 000 kilomètres, abrite de nombreux écosystèmes côtiers, où l'interaction dynamique des terres et de l'eau maintient une grande diversité écologique. Quelque sept millions de Canadiens vivent dans ces régions côtières, et nombre d'entre eux dans de petites collectivités vivant du tourisme et des ressources océaniques. La santé des écosystèmes côtiers est donc d'une importance critique pour leur bien-être culturel et économique.

La sensibilité des côtes aux impacts du changement climatique, et plus spécifiquement à l'élévation du niveau marin, est fonction de divers facteurs, en particulier les caractéristiques régionales des processus océaniques, la nature de la côte, et le fait que des mouvements verticaux de la croûte terrestre y causent un soulèvement ou un affaissement des masses terrestres. Une grande partie de la côte du Canada est tourmentée et déserte. Dans des régions comme celle de la baie d'Hudson, la masse terrestre est encore en train de relever en réaction à la déglaciation survenue il y a des milliers d'années. Ces mouvements peuvent compenser au moins une partie des effets de l'élévation planétaire du niveau des mers. Le Canada

FIGURE 5.4

Sensibilité des côtes canadiennes à l'élévation du niveau de la mer



est donc beaucoup moins vulnérable aux impacts de la montée du niveau marin que bien d'autres nations. Mais il ne sera pas totalement épargné (figure 5.4).

Dans les provinces Maritimes, par exemple, la combinaison de l'enfoncement des masses terrestres et de l'abondance de rives sableuses rend plus de 80 % du trait de côte de la région modérément à très sensible à la montée des mers. Une élévation accélérée inonderait une grande partie des terres basses de la région, causant la disparition de certains marais salés tidaux de très grande productivité. Une bonne partie des marais d'eau douce côtiers deviendraient des marais salés, et les côtes de matériaux tendres s'éroderaient plus rapidement. À cause d'une réduction de la couverture de glace de mer et d'une intensification probable des ondes de tempête, les vagues frapperaient le rivage avec plus d'énergie, ce qui viendrait y exacerber les problèmes d'inondation et d'érosion. Dans les régions peuplées, cet état de choses aura des impacts considérables sur l'infrastructure bâtie. Sur la seule rive nord de l'île du Prince-Édouard, la valeur estimée actuelle des propriétés côtières pourrait perdre environ 10 % d'ici 20 ans, et près de 50 % dans le prochain siècle.

Sur les côtes de l'Arctique, les plus grands impacts du changement climatique seront probablement ceux liés à la réduction de la couverture de glace et à la dégradation du pergélisol. La réduction de la couverture de glace de mer sera bénéfique pour certaines espèces océaniques, comme les baleines, qui ont besoin d'un accès à l'eau libre, mais néfaste pour d'autres, comme les phoques et les ours blancs, qui ont besoin de la présence de glace. Elle ouvrirait les eaux de l'Arctique à la navigation maritime et à créer de nouvelles possibilités de développement économique dans la région. Cependant, cette situation vient accentuer les préoccupations en matière de pollution et de souveraineté, et aurait un impact négatif sur les habitants du Nord qui ont besoin d'une vaste couverture de glace stable pour voyager en sécurité, avoir accès aux collectivités et aux territoires de chasse, et pratiquer d'autres activités traditionnelles. La dégradation du pergélisol aurait aussi pour effet de déstabiliser les terres côtières, ce qui fera croître les risques de glissements de terrain et s'ajouterait à l'érosion causée par l'élévation du niveau marin et par la réduction de la couverture de glace. Des collectivités des basses terres de l'ouest de l'Arctique subissent déjà ce genre de changements. Dans certaines parties de Tuktoyaktuk, par exemple, on a noté un important recul de la côte depuis 1935, qui a eu pour effet de détruire ou d'obliger à relocaliser un certain nombre de bâtiments. Même si des mesures de protection ont été prises pour aider à stopper ce recul, une montée supplémentaire du niveau marin et la dégradation du pergélisol entraîneraient de nouveaux cas d'inondation et d'érosion.

Une autre région côtière très sensible est celle du delta du Fraser, en Colombie-Britannique. En effet, d'importantes parties de cette région densément peuplée sont situées à moins d'un mètre au-dessus du niveau de la mer, et déjà protégées par un vaste système de digues. Ici, les principales préoccupations sont la rupture des digues, l'érosion des zones côtières de matériaux tendres et les risques subséquents pour les écosystèmes, l'infrastructure et les sites archéologiques côtiers. Une montée de un mètre du niveau de la mer mettrait en péril plus de 15 000 hectares de propriétés résidentielles et industrielles et 4 600 hectares de terres agricoles très productives, et l'intrusion saline contaminerait une grande partie des eaux souterraines de la région.

LES TRANSPORTS

Chaque année, les Canadiens consacrent plus de 150 milliards de dollars au transport de personnes et de marchandises sur le territoire national et en direction ou en provenance de l'étranger. Cette activité emploie plus de 800 000 personnes, emprunte plus de 1,4 million de kilomètres de routes, 50 000 kilomètres de voies ferrées et 1700 aéroports et fait intervenir 17 millions de véhicules à moteur, 28 000 avions et 2000 navires marchands. C'est un système essentiel à l'économie et à la culture du Canada, mais aussi un système dont les divers composants sont sensibles aux conditions climatiques et météorologiques tout au long de leur durée de vie, que ce soit sur les plans de la planification, de la conception, de la construction, de la maintenance ou de la performance.

Bien que l'infrastructure de transport canadienne soit très robuste, les changements à venir du climat auront sur elles des impacts significatifs, les uns positifs et les autres négatifs. Par exemple, avec des hivers plus chauds, le gel causera moins de dommages aux chaussées et aux voies ferrées dans de nombreuses régions du sud, et la saison d'enlèvement de la neige et de risques connexes sera plus courte. Par contre, ces hivers plus doux pourraient faire croître les dommages à l'infrastructure de transport de surface dans les régions susceptibles de connaître une augmentation des cycles gel-

dégel. Une plus grande fréquence de jours très chauds en été pourrait aussi faire monter les dommages aux routes et aux voies ferrées. Dans le nord, les hivers plus doux réduiront la capacité de charge et la durée d'utilisation des routes d'hiver qui permettent de transporter marchandises et ressources vers les collectivités isolées et de les en ramener. La dégradation du pergélisol viendrait affecter les routes toutes saisons et le transport de ressources par voie ferrée ou pipeline.

Des changements de la fréquence et de la gravité d'autres types de phénomènes météorologiques extrêmes peuvent aussi avoir des incidences sérieuses sur le secteur des transports. Les grandes inondations, dont on prévoit qu'elles seront plus fréquentes, peuvent arracher d'importantes sections de plates-formes de routes et d'assiettes de rails, et l'occurrence plus fréquente de tempêtes d'hiver intenses peut faire encourir des pertes économiques supplémentaires dues à des perturbations majeures du transport aérien et de surface.

Pour ce qui est du transport maritime, avec des hivers plus doux et des saisons de glace plus courtes, la saison de navigation pourra être plus longue, et comporter moins de risques de dommages causés par les glaces aux navires et aux infrastructures côtières. Le passage du Nord-Ouest pourrait à terme devenir une très importante route maritime internationale. Par contre, une augmentation des crues des glaciers du Groenland pourrait accroître les dangers posés par les icebergs. De plus, dans le système de la Voie maritime des Grands Lacs et du Saint-Laurent, une baisse de niveau des lacs réduirait la capacité des transports maritimes.

LA SANTÉ ET LE BIEN-ÊTRE DES POPULATIONS HUMAINES

Jouir d'une bonne santé est un des éléments essentiels du bien-être. C'est pour cela que les Canadiens dépensent chaque année plus de 100 milliards de dollars afin de maintenir et d'améliorer leur santé.

Or, les conditions météorologiques sont un important facteur de notre état de santé. Au Canada, par exemple, les décès imputables aux coups de chaleur ou aux crises cardiaques sont le plus fréquents en été, lorsque le stress thermique est le plus susceptible d'avoir une influence. D'un autre côté, les maladies et décès dus à des infections respiratoires, comme les pneumonies ou les grippes virales, sont plus fréquents en hiver. Les phénomènes météorologiques extrêmes (inondations, sécheresses, tempêtes de vent, foudre et épisodes de pollution atmosphérique) peuvent avoir sur notre bien-être des conséquences sérieuses, voire mortelles.

Les impacts du changement climatique sur cette relation entre la santé et les conditions météorologiques seront complexes. Par exemple, une élévation même mineure des températures moyennes peut causer une augmentation disproportionnée du nombre de jours très chauds, et donc de l'occurrence de décès et de maladies dus à la chaleur. Il a aussi été projeté que les épisodes de smog intense deviendraient plus fréquents pendant ces jours chauds de l'été, et infligeraient des stress supplémentaires aux jeunes enfants, aux personnes âgées et à celles souffrant de problèmes respiratoires. En période de grave sécheresse, les tempêtes de poussière et la fumée des feux de forêt peuvent se superposer à ces stress.

Le réchauffement du climat et l'altération du comportement des systèmes météorologiques peuvent également influer sur la propagation de diverses maladies et substances nocives. Pendant les inondations, les bactéries et substances chimiques présentes dans les eaux usées et dans le ruissellement des terres agricoles peuvent être introduites dans l'eau de boisson et obliger par exemple à interdire la baignade sur les plages. Le réchauffement du climat fait également augmenter le risque d'empoisonnement alimentaire en favorisant l'activité microbienne ou les proliférations d'algues toxiques dans les milieux marins. Le récent réchauffement observé dans le sud du Canada a aussi contribué à la propagation de maladies portées par les insectes ou les rongeurs, comme la fièvre du Nil occidental ou la maladie de Lyme. La réapparition du paludisme dans le sud du Canada est un autre risque de danger pour la santé.

Dans le nord du pays, les changements du milieu physique rendront les hivers moins rigoureux pour l'organisme, mais accroîtront les risques liés aux déplacements sur des surfaces de glace plus minces, et rendront plus dangereuse la récolte d'aliments traditionnels. En outre, les changements de la circulation atmosphérique et l'élévation des températures peuvent accentuer le risque de transport vers le nord de polluants nocifs des régions industrielles.

LA PRODUCTION ET L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE

Chaque année, le Canada consomme environ 11 pétajoules d'énergie et en exporte plus de 5 pétajoules, surtout vers les États-Unis. L'exploration, la production, le transport et l'utilisation de l'énergie sont donc un volet important de l'économie du pays, avec quelque 225 000 emplois directs et une contribution d'environ 65 milliards de dollars au produit intérieur brut. Le secteur de l'énergie, très sensible aux conditions météorologiques et à leurs variations, est donc susceptible d'être profondément touché par le changement climatique.

Par exemple, la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation des résidences, bureaux et usines varie avec la température extérieure. D'ici une cinquantaine d'années, le réchauffement projeté du climat du Canada pourrait y faire baisser de 20 à 30 % les coûts du chauffage en hiver. Ces économies seront cependant partiellement neutralisées par l'augmentation des coûts de climatisation en été dans le sud du pays. Par ailleurs, un climat plus chaud entraînerait une amélioration générale de l'efficacité du transport par voie terrestre et maritime.

Cependant, le changement climatique peut aussi avoir des effets significatifs sur la production et le transport de l'énergie. Dans le sud du Canada, par exemple, où l'on prévoit une baisse des niveaux moyens des lacs et des débits des cours d'eau, ainsi qu'une augmentation de fréquence des sécheresses graves, on observera probablement une diminution du potentiel de production d'hydroélectricité. La situation devrait être inverse dans le nord, où l'eau devrait devenir plus abondante. Il y a également un risque que, avec des tempêtes d'hiver plus intenses, les réseaux de transmission d'électricité subissent plus de dommages et de perturbations. L'adoucissement des hivers serait lui aussi bénéfique pour ce secteur puisque les saisons de glace seraient plus courtes, mais s'accompagnerait de problèmes supplémentaires liés à l'augmentation de fréquence des embâcles de milieu d'hiver.

Dans le nord et sur les côtes, les activités de transport et de production d'énergie à partir de combustibles fossiles devront composer avec les effets de la dégradation du pergélisol sur les routes et pipelines, et avec un risque accru de présence d'icebergs à proximité de la côte est.

LA SÉCURITÉ MONDIALE

Les experts prédisent que ce sont probablement les régions pauvres de la planète, dont un grand nombre sont déjà aux prises avec une insuffisance de ressources en nourriture et en eau et avec d'autres problèmes, tels que l'élévation du niveau marin, qui subiront les pires coûts économiques et sociaux du changement climatique. Or, même les catastrophes d'ordre climatique survenant à l'étranger auront de nombreuses implications indirectes pour la sécurité économique, sociale et politique des Canadiens. Par exemple, les changements de la distribution mondiale de la production alimentaire entraîneront un réaménagement des structures classiques de commerce des denrées alimentaires. Le Canada, en tant que grand exportateur et importateur de produits alimentaires, devra s'adapter aux nouvelles conditions, et trouver dans certains cas de nouveaux fournisseurs et dans d'autres de nouveaux marchés.

En même temps, le bouleversement social que pourraient créer dans le monde en développement les disettes chroniques et autres catastrophes liées au changement climatique imposeront des pressions supplémentaires au Canada : fourniture d'aide d'urgence, accueil de réfugiés de l'environnement et aide à la résolution des conflits armés que pourrait faire naître la rareté accrue des ressources. De plus, le monde s'attendra à ce que le Canada et les autres nations industrialisées, tout en recherchant des mesures nationales dynamiques, et peut-être coûteuses, pour réduire leurs propres émissions de gaz à effet de serre, transfèrent des ressources financières et techniques pour aider les pays en développement à en entreprendre de semblables.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES

Malgré les incertitudes dont ils sont entachés, les modèles du climat fournissent maintenant une indication raisonnablement claire de l'orientation que prendra probablement le changement à grande échelle des climats moyens en surface dans les décennies à venir. Mais il ne faut pas oublier que tant les populations humaines que les écosystèmes sont beaucoup plus vulnérables à la fréquence, à l'intensité et à la durée de phénomènes météorologiques extrêmes comme les sécheresses, inondations, tempêtes de vent et vagues de chaleur ou de froid qu'à des changements graduels du climat. Or, ces événements, qui dépassent souvent le seuil de tolérance de nos systèmes sociaux et écologiques, sont difficiles à prévoir; ils peuvent donc s'accompagner de souffrances, de pertes économiques, de graves perturbations sociales et écologiques, et même de pertes de vies.

Pour bien comprendre l'impact d'une amplification de l'effet de serre, il est donc essentiel de déterminer l'influence qu'aura le changement climatique sur les risques liés aux épisodes de conditions météorologiques extrêmes. Malheureusement, les modèles du climat n'ont jusqu'ici fourni que des indications préliminaires de l'évolution possible de ces risques. Les études menées sur les relations passées entre le climat et les phénomènes météorologiques extrêmes et l'utilisation de modèles des phénomènes extrêmes liés à des modèles du climat ont fourni d'autres perspectives. Les experts accordent beaucoup de confiance à certains des résultats, comme ceux liés aux extrêmes de température, mais beaucoup moins à ceux concernant d'autres types d'extrêmes.

Ces études suggèrent avec beaucoup de confiance, ce qui n'est pas surprenant, que les vagues de chaleur estivales deviendront plus fréquentes et plus fortes, alors que les périodes de grands froids en hiver seront moins fréquentes – mais il y en aura encore. D'ici 2050, par exemple, les jours où la température estivale dépassera 30 °C dans le sud du Canada seront probablement quatre fois plus nombreux que maintenant. Les épisodes de précipitations extrêmement faibles ou extrêmement abondantes devraient aussi être plus fréquents; vers le milieu du XXIe siècle, les périodes extrêmes de faibles précipitations dans le centre de l'Amérique du Nord, qui surviennent aujourd'hui à peu près tous les 50 ans, pourrait avoir une récurrence de seulement 15 à 20 ans. À l'opposé, les épisodes de pluies intenses pourrait être deux fois plus fréquents qu'aujourd'hui. Ces changements ont des implications majeures pour la fréquence des graves sécheresses et inondations.

La certitude est beaucoup plus basse pour ce qui est des impacts du changement climatique sur la fréquence et la gravité de tempêtes comme les ouragans, les tornades et les blizzards. On a cependant des indications que l'intensité potentielle maximale de ces perturbations va probablement augmenter à mesure que monteront les températures à la surface de la Terre.

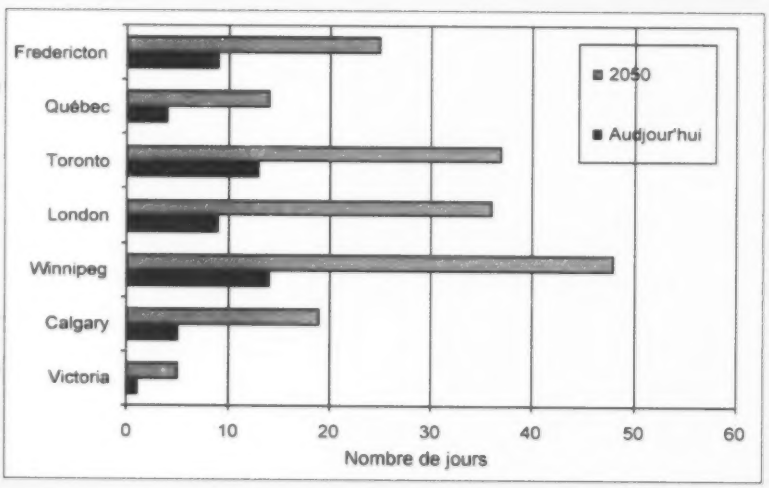


FIGURE 5.5

Nombre de jours chauds* par an où la température maximale dépasse 30 °C, 2050 vs aujourd'hui

CHAPITRE 6

Comment réagissons-nous?

Comme on l'a vu dans les chapitres qui précèdent, le changement climatique est d'une telle complexité qu'il n'est encore compris qu'en partie. C'est également une question d'une importance cruciale pour les sociétés humaines, surtout celles des régions en développement et des générations à venir. Dans l'ensemble, les experts conviennent que les décideurs ne peuvent pas attendre pour agir que toutes les questions scientifiques aient reçu réponse, parce qu'il risquerait alors d'être beaucoup trop tard pour faire quoi que ce soit. C'est pourquoi nous devons aborder le changement climatique dans une optique de gestion du risque.

Il nous faut pour cela avoir trois types de réponses, distincts mais complémentaires.

D'abord, les scientifiques doivent continuer de travailler avec acharnement à mieux comprendre comment fonctionne le système climatique, comment il est susceptible de se modifier dans l'avenir, comment ces changements peuvent influer sur les écosystèmes naturels et la société humaine et comment nos activités peuvent s'y superposer. Cet élargissement des connaissances bénéficiera aux décideurs du futur, qui devront prendre des décisions de plus en plus délicates face aux risques posés par l'évolution du climat.

Ensuite, les décideurs doivent déjà envisager quelles mesures peuvent être prises dès maintenant pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, qui seront, selon les prévisions, les moteurs premiers du changement climatique à venir. Ces émissions doivent en effet être ramenées à un niveau tel que la vitesse et l'ampleur du changement climatique à venir restent dans des limites acceptables. Ces mesures ne sauraient en aucun cas empêcher le changement climatique de se produire – il est déjà trop tard pour cela – mais pourraient, espère-t-on, donner aux écosystèmes et aux sociétés plus de temps pour s'adapter aux changements qui ne manqueront pas de survenir. Ces mesures seront peut-être modestes au début, mais elles devront sans aucun doute être renforcées à mesure que progresse la compréhension scientifique, et que les indications de changements potentiellement dangereux du climat deviennent plus convaincantes.

La troisième stratégie de réponse est de prévoir les changements du climat dont on prévoit qu'ils sont inévitables, et de s'y préparer en adoptant des mesures d'adaptation. Celles-ci nous aideront à améliorer notre tolérance au changement et à relever les seuils d'acceptabilité.

UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'effort mondial de recherche

En 1957, Roger Revelle et Hans Seuss, des chercheurs des États-Unis, ont clairement averti la communauté scientifique internationale que l'interférence de l'homme dans le système climatique était un problème sérieux, sur lequel il convenait de se pencher. Ils faisaient remarquer que l'augmentation rapide des émissions de dioxyde de carbone, due à la croissance exponentielle de l'utilisation de combustibles fossiles à des fins de production d'énergie, était en train de déclencher sur Terre une expérience géophysique d'échelle planétaire qui était mal comprise et potentiellement dangereuse. Revelle et Seuss ont demandé que soit lancé un vaste effort mondial de recherche pour en comprendre les implications, et ont eux-mêmes mis en place un programme de surveillance rigoureuse de la composition de l'atmosphère.

C'est seulement une vingtaine d'années après cette mise en garde que la communauté scientifique internationale a commencé à réagir de façon organisée et coordonnée. Un des grands jalons de cette évolution a été la première Conférence mondiale sur le climat, tenue à Genève en 1979. Les participants y ont examiné le comportement inhabituel des conditions météorologiques planétaires des décennies précédentes, discuté des mesures à prendre pour mieux comprendre le fonctionnement du système climatique, et convenu de la nécessité de coordonner et d'accélérer les efforts

nationaux de recherche en ce domaine. En réponse, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) a collaboré avec le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et le Conseil international pour la science (alors appelé Conseil international des unions scientifiques, ou CIUS) pour mettre en marche le Programme climatologique mondial (PCM). En 1986, le CIUS lançait une ambitieuse initiative complémentaire, le Programme international Géosphère-Biosphère (PGB), qui avait pour objectif d'élargir les efforts de recherche du PCM pour inclure la totalité de l'écosystème de la Terre.

Ces programmes, et d'autres qui leur sont connexes, ont déjà substantiellement contribué à notre compréhension du système climatique de la Terre et de la sensibilité des écosystèmes et des sociétés humaines aux changements qui y prennent place. Les recherches se poursuivent et continuent d'améliorer notre connaissance de l'influence de certains éléments, tels que les nuages, la glace de mer et le cycle hydrologique, sur les processus en jeu dans le climat. Elles permettent aussi d'éclairer de grandes zones d'incertitude telles que le rôle complexe des océans en tant que réservoir de gaz à effet de serre et que source, puits et transporteur de chaleur. Étant donné que les manifestations du changement climatique varieront d'une région à l'autre, on tente également de créer des scénarios utiles des changements climatiques régionaux. En même temps que se poursuivent ces travaux de recherche, les études sur les impacts et l'adaptation commencent à repérer lesquels des systèmes naturels et humains sont les plus sensibles au changement climatique et à examiner comment ces sensibilités pourraient être améliorées à l'aide de mesures d'atténuation des impacts. À mesure qu'elles progressent, ces études doivent aussi se pencher soigneusement sur l'impact total de toutes les agressions imposées aux écosystèmes naturels et à la santé humaine, dont les précipitations acides, l'augmentation du rayonnement ultraviolet atteignant la surface, la pollution atmosphérique et le changement climatique.

L'évaluation et la diffusion de la science du changement climatique

De tous temps, les scientifiques ont cherché à acquérir de nouvelles connaissances en observant le comportement des systèmes physiques et chimiques, en avançant des hypothèses pour décrire les processus qui interviennent dans ce comportement, puis en vérifiant par expérimentation la validité de ces hypothèses. Les résultats sont ensuite présentés à des pairs, qui entament des débats contradictoires pour tenter d'invalider l'hypothèse et/ou de reproduire les résultats. C'est à travers ce processus scientifique que s'accumulent lentement les connaissances supplémentaires qui aident à mieux comprendre le comportement des systèmes naturels et à conseiller en conséquence les non scientifiques. À bien des égards, la confiance dans les informations scientifiques diffusées repose largement sur l'échec des tentatives visant à réfuter les hypothèses et les théories, plutôt que sur la capacité de fournir une preuve absolue.

Cependant, certaines questions scientifiques, dont le changement climatique, sont très complexes. Comme elles font intervenir un grand nombre de disciplines scientifiques, elles obligent à prendre en considération des réseaux d'interactions et rétroactions subtiles entre leurs divers composants. En outre, du moins dans le cas du système climatique, la société humaine est étroitement liée au comportement qu'elle étudie – à la fois par les changements qu'elle cause et par les rétroactions dues à sa réponse aux impacts de ces changements. Enfin, comme les conséquences de l'expérience géophysique que les humains sont en train de mener sur la planète ont déjà commencé à se manifester et sont potentiellement dangereuses, il est urgent de prendre des mesures pour réduire les risques. Autrement dit, les politiciens et le public devront peut-être réagir à la menace bien avant que n'aient été trouvées toutes les réponses scientifiques à leurs questions et préoccupations. Il y a là un énorme défi de communication pour la communauté scientifique, puisqu'elle doit en fait fournir aux décideurs toute l'information disponible dont ils ont besoin sans compromettre son intégrité scientifique.

Pour que ces connaissances scientifiques en continuelle évolution soient rapidement et efficacement mises à la disposition de la communauté des politiques, on doit procéder régulièrement à des évaluations scientifiques pluridisciplinaires. De plus, pour contribuer à assurer l'exactitude, la pertinence et l'exhaustivité de ces évaluations, ces dernières elles-mêmes doivent être revues à la fois par la communauté des experts scientifiques et par des intervenants extérieurs à ce milieu. C'est ainsi qu'en 1988 l'OMM et le PNUE, à la demande de l'Assemblée générale des Nations Unies, ont créé le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), qu'ils ont chargé de coordonner et de faciliter de tels processus d'évaluation pour la science du changement climatique.

À ce jour, le GIEC a préparé trois grandes évaluations exhaustives de la science du changement climatique, la première en 1990, la deuxième en 1995 et la troisième en

2001. Une quatrième, en cours de rédaction, devrait être terminée en 2007. Les évaluations se sont concentrées sur trois grands thèmes : la science du climat, les impacts et l'adaptation, et les options d'atténuation. Chacune a demandé plus de deux ans de travail, et mis à contribution plusieurs milliers d'experts scientifiques du monde entier, qui en ont rédigé et révisé le contenu. Chaque rapport principal est également condensé en un Résumé à l'intention des décideurs (RID) et un Rapport de synthèse (RS). Le contenu, simplifié, de ces deux rapports est rédigé conjointement par les auteurs scientifiques principaux du rapport principal et des membres du personnel du Bureau du GIEC, puis négocié – ligne par ligne – par des représentants de gouvernements réunis en séance plénière du GIEC. Les auteurs principaux sont présents durant ce processus, de manière à assurer l'exactitude et l'intégrité de l'information fournie, et la participation de représentants des gouvernements permet de la rendre plus compréhensible et plus pertinente pour les décideurs.

Certains ont avancé, surtout par l'entremise de médias et de sites Web, que la confiance qu'on peut accorder à la science du changement climatique n'est pas suffisante pour justifier que des mesures soient prises dès maintenant, et que l'intégrité du processus d'évaluation du GIEC a été compromise par des interférences politiques. Cependant, après la publication du troisième Rapport d'évaluation du GIEC, les académies des sciences de dix-sept pays ont déclaré approuver fortement tant le processus d'évaluation du GIEC que les conclusions de ses rapports. De façon indépendant, un comité spécial des American National Academies of Sciences a informé par ailleurs le président des États-Unis que le troisième Rapport d'évaluation du GIEC sur la science du changement climatique était, selon lui, un « admirable résumé des activités de recherche en science du climat ». Le comité admettait que le RID mettait certes l'accent davantage sur les préoccupations liées aux risques posés par le changement climatique et moins sur les incertitudes que ne le faisait le rapport principal, ce qui est normal pour un document résumé, mais soulignait qu'il avait reçu la pleine approbation des coordonnateurs principaux. De plus, faisait remarquer le comité, ces différences n'influaient pas sur les conclusions fondamentales du rapport.

L'étude des liens avec d'autres questions atmosphériques

Le changement climatique et d'autres questions atmosphériques, comme l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, les pluies acides et la qualité de l'air à l'échelle locale, ne sont pas des problèmes environnementaux distincts, mais des conséquences d'une même cause plus fondamentale : l'effet des activités humaines sur la composition chimique de l'atmosphère. Les relations entre ces préoccupations sont en fait multiples et complexes.

Ces questions sont entre autres liées par les activités humaines qui libèrent les gaz et aérosols dont elles découlent, activités qui peuvent être regroupées en trois catégories vastes mais connexes : changements d'affectation des terres, procédés industriels et combustion de combustibles fossiles. Le rejet de chlorofluorocarbures, par exemple, à la fois contribue à détruire la couche d'ozone dans la stratosphère et amplifie l'effet de serre. La combustion d'essence dans un moteur de voiture libère des gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et l'hémioxyde d'azote, mais aussi des gaz volatils comme les oxydes d'azote qui contribuent aux problèmes de smog urbain. Les processus chimiques qui donnent naissance au smog épuisent également les radicaux hydroxyle qui extraient de l'atmosphère le méthane, un autre gaz à effet de serre.

Parmi les autres liens entre ces questions figurent les processus physiques et réactions chimiques complexes qui prennent place dans l'atmosphère. On s'attend, par exemple, à ce que l'amplification de l'effet de serre fasse réchauffer les basses couches de l'atmosphère, mais refroidir ses couches supérieures, ce qui entraînera des changements du taux de production et donc de la distribution de l'ozone dans cette région de la haute atmosphère. Elle pourrait cependant aussi accroître les risques de trous de l'ozone au-dessus des régions arctiques. À proximité de la surface, des températures plus élevées peuvent faire augmenter le nombre de jours où la qualité de l'air est mauvaise. De plus, des modifications des courants atmosphériques causées par les inégalités du réchauffement du climat de la Terre pourraient aussi changer la répartition des régions affectées par les pluies acides.

Enfin, les dommages pour les écosystèmes et la santé humaine sont parfois dus à l'action simultanée de plusieurs de ces stress. Des écosystèmes déjà affaiblis par l'acidification ou par l'exposition à l'ozone troposphérique et/ou au rayonnement UV-B peuvent dépérir s'ils sont en plus soumis aux stress supplémentaires de la chaleur ou de la sécheresse. Par ailleurs, des lacs acidifiés qui se sont lentement rétablis peuvent se réacidifier si la sécheresse expose les parties peu profondes du fond et fait ré-oxyder les sulfates qui, avec le temps, se sont déposés dans les sédiments. Des études avancent que le nombre

de décès humains peut augmenter significativement si des personnes vulnérables sérieusement affectées par la mauvaise qualité de l'air doivent en plus faire face au stress de la chaleur.

Il est donc essentiel de comprendre ces liens pour élaborer une réponse efficace à ces problèmes. Comme les mesures prises en réaction à un problème peuvent jouer sur certains des autres, voire sur tous, il faudra adopter une approche holistique pour agir avec efficacité et efficience.

VERS UN CONSENSUS SUR LA NÉCESSITÉ D'AGIR

Le dialogue entre les scientifiques et les décideurs sur les risques d'un changement climatique dû aux activités humaines avait été entamé bien avant que le GIEC entreprenne ses évaluations scientifiques exhaustiques. Par exemple, en 1985, des experts du changement climatique venus de divers pays se sont réunis à Villach, en Autriche, pour faire le point sur la compréhension du changement climatique. À la fin de cette rencontre historique, ils ont publié une déclaration avertissant les gouvernements du monde entier que l'hypothèse sur laquelle sont fondées nombre des grandes décisions économiques prises aujourd'hui, à savoir la constance du climat, n'était plus valide.

Dans les cinq ans qui ont suivi, un certain nombre de réunions et conférences ont été organisées par divers gouvernements pour discuter de la façon de réagir à l'avertissement formulé à Villach. La Conférence mondiale sur l'atmosphère en évolution : implications pour la sécurité du globe, qui a eu lieu en 1988 à Toronto sous le parrainage du Canada, a été un des premiers éléments, crucial, de ce processus. Elle a réuni près de 300 politiciens, conseillers en matière de politiques, juristes, défenseurs de l'environnement et scientifiques, qui ont discuté des bases scientifiques des inquiétudes face au changement de l'atmosphère et recommandé une ligne de conduite à la communauté mondiale. Les participants craignaient beaucoup que l'impact de l'homme sur l'atmosphère n'en soit arrivé à constituer une « expérience non intentionnelle, désordonnée et d'envergure planétaire dont les conséquences finales pourraient se classer juste derrière une guerre nucléaire mondiale ». Un des résultats significatifs de la conférence a été qu'elle a réussi à transmettre à la communauté mondiale les inquiétudes du milieu scientifique quant au changement climatique. Tout aussi importante a été sa recommandation de ramener, d'ici 2005, les émissions mondiales de dioxyde de carbone à 20 % sous les niveaux de 1988.

Rapidement, il s'est tenu d'autres rencontres, qui ont fait réaliser que, même si les mesures unilatérales restaient précieuses, le succès planétaire de la lutte contre le changement climatique était conditionnel à une collaboration des nations du monde entier. Il s'ensuit que les milieux internationaux ont entrepris de formuler une compréhension commune des questions et d'explorer la possibilité d'un consensus international et d'une réponse politique mondiale.

LA RÉACTION PLANÉTAIRE EN MATIÈRE DE POLITIQUES

Tandis que s'élaborait ce processus de recherche d'un consensus sur des principes d'action en réponse au changement climatique, l'Assemblée générale des Nations unies entamait ses propres délibérations sur la menace que représente ce phénomène. Après avoir adopté diverses résolutions exprimant ses préoccupations quant aux risques que pose le changement climatique pour l'humanité et à la nécessité d'agir, l'Assemblée générale a demandé en 1988 à l'OMM et au PNUE de mettre sur pied le GIEC pour coordonner les évaluations scientifiques pertinentes.

De plus, elle a établi un Comité intergouvernemental de négociation chargé d'élaborer une Convention cadre sur le changement climatique (CCCC). Après deux ans de négociations intensives, la CCCC a été approuvée lors de la Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement, qui s'est tenue à Rio de Janeiro en 1992. L'objectif ultime de la CCCC est de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre à des niveaux qui empêcheraient une interférence « dangereuse » des activités humaines avec le système climatique. La Convention a maintenant été signée et ratifiée par plus de 190 pays, et chaque année depuis 1995 a lieu une réunion de la Conférence des Parties (CdP) à la Convention.

À la troisième réunion de la CdP, qui a eu lieu à Kyoto en 1997, les Parties ont fait un important pas en avant : elles se sont entendues sur l'établissement d'un Protocole à la Convention par lequel les Parties qui sont des pays développés s'engageraient à prendre les premières mesures concrètes pour réduire à l'échelle mondiale les émissions de gaz à effet de serre. L'une des dispositions clés de ce Protocole de Kyoto est que ces pays développés, appelés « Parties visées à l'annexe I », devraient réduire leurs émissions agrégées de six des principaux gaz à effet de serre d'environ 5,2 % par rapport au niveau de

1990 au cours de la période d'engagement allant de 2008 à 2012. Les cibles fixées pour chacun des pays allaient d'une réduction de 8 % pour les pays de l'Union européenne à une augmentation allant jusqu'à 10 % pour les pays où des circonstances particulières causaient une hausse rapide des émissions (p. ex. l'Islande).

En plus de la renégociation régionale de la cible de l'Union Européenne a montré que quelques pays ont accepté des cibles pouvant aller à un pourcentage aussi haut que 27 pour cent d'augmentation (Portugal) et aussi bas d'une réduction de 28 pour cent (Luxembourg). Le Canada a convenu de se fixer une cible de réduction de 6 % de ses émissions. Les pays autres que les Parties visées à l'annexe I, bien que non tenues de s'engager dès cette première étape à atteindre des cibles spécifiques de réduction, doivent faire rapport sur leurs émissions et chercher à prendre des mesures volontaires pour les limiter.

Pour entrer en vigueur, le Protocole de Kyoto devait être signé et ratifié par au moins 55 des Parties. De plus, les Parties qui ratifiaient le Protocole devaient représenter au moins 55 % du volume total des émissions de 1990 pour l'ensemble des Parties visées à l'annexe I. En juillet 2005, 151 pays avaient ratifié le Protocole. Aspect plus important encore, avec la ratification de la Russie en novembre 2004, les Parties ayant ratifié le Protocole représentaient 61 % du volume total des émissions des Parties visées à l'annexe I. Les deux critères étant respectés, le Protocole est devenu le 16 février 2005 juridiquement contraignant pour les Parties qui l'ont ratifié.

LA RÉACTION DU CANADA

Le gouvernement du Canada maintient que le changement climatique est l'un des plus grands défis posés à la planète en termes d'environnement et de développement durable, et que le Protocole de Kyoto est le seul mécanisme mondial permettant de commencer à réduire les émissions de gaz à effet de serre. C'est pourquoi le Canada a ratifié le Protocole de Kyoto en décembre 2002 et juge qu'il s'agit d'un pas important dans la bonne direction.

La tâche d'atteindre la cible fixée au Canada par Kyoto est toutefois un énorme défi. Tant la population que l'économie de notre pays connaissent une forte croissance depuis 1990. Ce signe de santé a pour contrecoup une augmentation notable des émissions. Entre 1990 et 2003, les émissions de gaz à effet de serre au Canada ont augmenté de 24 %. L'objectif du Canada est de réduire les émissions à un niveau de 6 % inférieur au niveau de 1990 sur la période 2008-2012, ce qui correspond à une baisse des émissions de l'ordre de 270 mégatonnes.

Pour relever ce défi, le gouvernement a présenté le 13 avril 2005 son Plan 2005 sur les changements climatiques : *Aller de l'avant pour contrer les changements climatiques : Un plan pour honorer notre engagement de Kyoto*.

Ce Plan est un élément clé du Projet Vert, la grande vision environnementale du gouvernement qui vise à créer un environnement plus sain et une économie plus vigoureuse. Il précise l'approche générale et les mécanismes de mise en œuvre qui vont guider les mesures à prendre dans l'ensemble de l'économie pour permettre au Canada de respecter son engagement à l'égard du Protocole de Kyoto d'une façon qui favorise la compétitivité de l'économie tant à court terme qu'à long terme. Ces mécanismes sont notamment le Fonds pour le climat, le régime visant les grands émetteurs finaux et le Fonds du partenariat.

Premier outil de l'approche canadienne dans le dossier du changement climatique, le Fonds pour le climat est un mécanisme à base commerciale qui va encourager la réduction des émissions dans l'ensemble de l'économie. Le Fonds pour le climat vise à créer une institution permanente pour l'achat de crédits de réduction des émissions au nom du gouvernement du Canada.

FIGURE 6.1

Délégués nationaux discutant le Protocole de Kyoto à une des réunions de la CdP

Les grands émetteurs du Canada sont des sociétés des secteurs des mines et de la fabrication, du pétrole et du gaz, et de la thermoélectricité. Ces secteurs, qui tiennent une grande place dans la base économique du pays, contribuent aussi de façon importante (près de 50 %) au volume total des émissions de gaz à effet de serre du Canada. Le Plan 2005 sur les changements climatiques définit un régime pour les grands émetteurs finaux de ces secteurs, tout en favorisant leur croissance et leur compétitivité.

Le Fonds du partenariat va constituer une base pour la synergie et la collaboration avec les provinces et les territoires grâce à des initiatives stratégiques de partage des coûts. Les projets visant les énergies propres et l'efficacité énergétique seront prioritaires, car ils vont rapprocher les programmes et les services des personnes qui en ont besoin.

Les programmes sur le changement climatique jouent un rôle important dans la réduction des émissions et la promotion d'une action rapide. Dans le Budget 2005 et le Plan, de nombreux programmes ont pris de l'expansion, y compris l'initiative EnerGuide pour les maisons ainsi qu'un encouragement à l'utilisation de l'énergie éolienne. Le gouvernement a également annoncé une aide à la production de l'énergie renouvelable en soutien aux sources d'énergie renouvelables émergentes. Pour promouvoir plus avant l'essor de l'énergie renouvelable, on a augmenté les taux de déduction pour amortissement applicables aux investissements dans les systèmes très performants de production et d'utilisation de l'énergie renouvelable.

Le Plan tire parti des fonds déjà investis par le gouvernement dans le domaine du changement climatique. De 1997 à 2003, d'un budget à l'autre, le gouvernement a progressivement augmenté ses investissements pour atteindre 3,7 milliards de dollars.

Le Plan d'action 2000, par exemple, comprend 45 mesures qui visent des secteurs clés représentant 90% des émissions de gaz à effet de serre du Canada. Bon nombre de ces mesures ont ouvert de nouvelles voies; celles qui ont donnés de bons résultats ont souvent reçu un appui supplémentaire. Il s'agit par exemple des programmes qui encouragent la modernisation des immeubles commerciaux existants pour en améliorer l'efficacité énergétique.

Ces premiers programmes ont ouvert la voie au Plan du Canada sur les changements climatiques de 2002, qui faisait appel à une gamme plus vaste d'outils comme l'information, les incitatifs, la réglementation et les mesures fiscales, dans divers secteurs : transports; immeubles résidentiels et commerciaux / institutionnels; grands émetteurs industriels; énergie renouvelable et combustibles fossiles plus propres; agriculture; exploitation forestière et enfouissement sanitaire. Alors que les premiers programmes ont posé les jalons du changement sur le plan comportemental, technologique et économique, les nouveaux investissements inscrits dans le Budget 2005 et précisés dans le Plan du Canada sur les changements climatiques de 2005 vont être cruciaux si le Canada veut s'engager sur la voie de la baisse des émissions, démarche nécessaire pour réaliser les fortes réductions qui vont être indispensables.

Le Canada a également pris des mesures pour accroître sa contribution afin d'améliorer la compréhension scientifique du changement climatique, et pour appliquer ces connaissances de façon à aider les Canadiens à s'adapter aux changements qui sont inéluctables, quels que soient les efforts déployés pour réduire à l'échelle mondiale les émissions de gaz à effet de serre. L'injection de fonds dans les initiatives de recherche gouvernementales et universitaires au Canada, grâce à des programmes comme le Fonds d'action pour le changement climatique, le Plan d'action 2000 et les ressources fournies directement à la Fondation canadienne pour les sciences du climat et de l'atmosphère, permet de compléter les initiatives de recherche en cours sur le changement climatique. Si bon nombre de ces programmes sont de courte durée, ils permettent tout de même de maintenir le leadership international des scientifiques canadiens qui contribuent à atténuer les incertitudes dans le domaine du changement climatique. Ils aident aussi à soutenir et à renforcer notre capacité d'étudier les impacts du changement climatique sur les Canadiens et d'explorer les options pour l'adaptation aux changements prévisibles.

Le protocole de Kyoto a beaucoup contribué à mobiliser le monde face au changement climatique, mais une nouvelle entente internationale doit jeter les bases d'une économie prospère du XXe siècle, novatrice et efficace, ainsi que conduire à accroître les réductions des émissions de GES. Pour s'acquitter des engagements qu'il a pris à Kyoto, le Canada dispose du plan

suivant : *Aller de l'avant en matière de changement climatique* reconnaît qu'une future entente internationale doit répondre à certains objectifs clés. Celle-ci doit :

- élargir la participation en établissant des objectifs équitables, y compris toutes les économies industrialisées et toutes les économies naissantes clés;
- aboutir à des résultats entraînant des progrès réels à long terme;
- offrir des incitatifs pour s'engager à concevoir et à partager des technologies environnementales de transformation destinées à réduire les émissions au pays et à l'étranger;
- mettre le plus possible à contribution les technologies actuelles non polluantes;
- appuyer un marché mondial du carbone rationalisé et efficace;
- s'occuper de l'adaptation ainsi que de l'atténuation.

Si nous voulons parvenir à tirer parti du protocole de Kyoto, il nous faut une approche vraiment mondiale et à long terme, ainsi que des mécanismes de marché efficaces. Une telle approche compterait de nombreux points de participation et permettrait l'échange vraiment mondial de droits d'émission, s'attacherait davantage à intégrer les objectifs de changement climatique aux politiques de développement et d'échange, traiterait mieux les questions de croissance économique pour tous les pays, accorderait plus d'importance au transfert efficace des technologies, en préconisant et en mettant en application des techniques novatrices et existantes.

Les objectifs fixés dans le plan du Canada pour nous acquitter de notre engagement à Kyoto représentent une solide base de lancement d'une concertation sur l'avenir.

LE RÔLE DES CITOYENS

Comment les citoyens canadiens peuvent-ils influer sur un problème environnemental d'envergure mondiale qui met déjà en échec la sagesse et les ressources des gouvernements et des organismes internationaux? La réponse, en deux mots, c'est qu'il revient aux citoyens eux-mêmes de créer un mouvement d'opinion qui va inciter les gouvernements à agir. Et il revient à chaque citoyen de prendre des mesures pour réduire ses propres émissions et de soutenir les politiques imposées par une intervention efficace face aux risques du changement climatique.

La quantité, estimée à 23 milliards de tonnes, de dioxyde de carbone qui est rejetée chaque année dans l'atmosphère de la Terre à cause de l'utilisation des combustibles fossiles n'est pas le fait des gouvernements, mais des six milliards de personnes et plus qui habitent maintenant la planète. Chaque fois que nous montons le thermostat, que nous conduisons une automobile, que nous laissons couler un robinet d'eau chaude ou que nous ouvrons la porte du réfrigérateur, nous ajoutons au problème. En modifiant nos attitudes et notre mode de vie, en nous renseignant et en repensant notre attitude face à l'environnement, nous pouvons influer sur le cours des choses.

Outre l'influence que nous pouvons exercer dans le domaine politique, il y a bien d'autres choses que nous pouvons faire dans notre vie personnelle pour alléger le fardeau que nous imposons à l'environnement. Chaque année, chaque Canadien produit en moyenne plus de cinq tonnes d'émissions de gaz à effet de serre.Le Défi d'une tonne encourage tous les citoyens à réduire leurs propres émissions d'une tonne par an ou de 20 %. Pour cela, il vaut viser l'efficacité énergétique, réduire le volume des ordures et la consommation d'eau et faire des choix de consommation intelligents. Le Défi propose toute une série d'actions, qui sont présentées dans la boîte ci-jointe. Vous trouverez des renseignements sur le Défi d'une tonne en visitant notre site Web : **http://www.changementsclimatiques.gc.ca/unetonne**

PROTÉGER L'ATMOSPHÈRE : UN PROJET PERSONNEL
The One-Tonne Challenge

Le guide du Défi d'une tonne propose ci-dessous des mesures que peuvent prendre les citoyens face au changement climatique. Ces mesures signifient globalement qu'on consomme moins d'énergie, qu'on économise de l'argent, qu'on améliore la qualité de l'air et qu'on protège l'environnement. Le Défi d'une tonne est un programme éducatif qui appelle les citoyens à réduire de 5 à 4 tonnes la quantité de GES produite annuellement par chacun d'entre eux.

Sur la route

Les autos et les camions qui circulent sur nos routes sont à l'origine d'environ 18 % de tous les GES produits au pays. Chaque année, les véhicules motorisés rejettent plus de 134 millions de tonnes de GES dans l'atmosphère. Voici ce que vous pouvez faire.

- Réduisez l'utilisation de votre voiture de 10 %.
- Minimisez l'utilisation de la climatisation.
- Débarrassez-vous de votre deuxième voiture.
- Ne laissez pas tourner votre moteur au ralenti.
- Respectez la limite de vitesse.
- Utilisez un chauffe-bloc avec minuterie.
- Entretenez bien votre véhicule.
- Utilisez un mélange essence-éthanol.
- Vérifiez la pression des pneus chaque mois.
- Enlevez le porte-bagages du toit.
- N'achetez pas un véhicule qui dépasse vos besoins.
- Achetez le véhicule le plus éconergétique.

À la maison

Une maison consomme énormément d'énergie : il y a le chauffage et la climatisation, les gros appareils ménagers, le chauffe-eau et l'éclairage. Jouir d'une maison confortable peut être coûteux, que vous en soyez le propriétaire ou le locataire. Il est donc important de faire des choix intelligents en achetant les électroménagers et les appareils les p lus éconergétiques sur le marché et en les gardant en bon état de marche. Voici quelques trucs sur ce que vous pouvez faire à la maison.

- Installez un générateur d'air chaud à faible consommation d'énergie.
- Rendez votre maison étanche à l'air en la calfeutrant et en utilisant des coupe-froid.
- Recherchez l'étiquette ENERGY STAR sur les fenêtres et les portes de verre coulissantes.
- Installez des contre-fenêtres.
- Remplacez les portes extérieures en mauvais état par des portes pleines à âme isolante ou ajoutez des contre-portes.

- Gardez votre générateur d'air chaud en bon état.
- Étanchéisez et isolez les conduits d'air chaud.
- Améliorez l'isolation des murs, du sous-sol et du grenier.
- Baissez le réglage du thermostat.
- Éteignez la veilleuse de votre foyer ou de votre foyer encastré au gaz naturel en été.

À la maison(continué)

- Installez un ventilateur de plafond.
- Enlevez les climatiseurs individuels de vos fenêtres pour l'hiver.
- Laissez vos rideaux ouverts pendant les journées d'hiver.
- Fermez les stores, les rideaux et les fenêtres pendant les journées d'été.
- Utilisez d'abord vos ventilateurs pour vous rafraîchir en été.

- Réglez votre climatiseur à 24 °C.
- Nettoyez le filtre de votre climatiseur chaque mois.
- Éteignez toutes les sources de chaleur en été.
- Gardez votre réfrigérateur et votre congélateur en bon état pour économiser l'énergie.
- Vous avez besoin d'un réfrigérateur neuf ? Recherchez un modèle qui répond aux exigences de haute efficacité ENERGY STAR.

- Débranchez votre deuxième réfrigérateur ou congélateur.
- Employez le cycle de séchage sans chaleur ou à l'air de votre lave-vaisselle.
- Améliorez l'efficacité de votre réfrigérateur et de votre congélateur en les éloignant des sources de chaleur.
- Rincez le linge à l'eau froide et lavez-le à l'eau tiède.
- Évitez le surséchage.

- Installez des minuteries pour contrôler les lumières extérieures.
- Utilisez des ampoules plus éconergétiques.
- Assurez-vous que votre ordinateur est configuré pour utiliser la fonction d'économie de l'énergie.
- Recherchez le symbole ENERGY STAR sur la boîte d'appareils neufs.
- Utilisez le moins de papier possible.

- Lorsque vous quittez votre bureau, éteignez les lumières et les appareils.
- Si vous achetez une imprimante laser, recherchez des caractéristiques éconergétiques.
- Achetez un moniteur dont la taille répond à vos besoins.
- Recueillez l'eau de pluie pour arroser votre jardin.
- « Recyclez » l'herbe coupée.

- Arrosez votre jardin et votre pelouse tôt. Évitez d'utiliser des pesticides et des engrais chimiques.
- Utilisez modérément les tondeuses.
- Entretenez bien votre piscine.
- Plantez des arbres.
- Installez une pomme de douche à débit réduit munie d'un dispositif d'arrêt.

- Procurez-vous un chauffe-eau à haute efficacité.
- Prenez une douche rapide au lieu d'un bain.
- Évitez de laisser couler le robinet.
- Isolez les tuyaux. Fermez le chauffe-eau en quittant le chalet.
- Recyclez autant que possible.

- Compostez les déchets organiques.
- Portez attention aux produits et à leur emballage.

Références des figures et tableaux et pour un complément d'information

Bachelet, D. et Neilson, R.P. 2000. Biome Redistribution Under Climate Change. In *The impact of climate change on America's forests: a technical document supporting the 2000 USDA Forest Service RPA Assessment*. (Joyce, L. A. and Birdsey, R., technical editors) Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-59. Fort Collins, CO.

CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Centre) Trends On Line at http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/trends.htm

CRC Handbook of Chemistry and Physics. *82nd Edition

Gajewski, K., Vance, R. Sawada, M., Fung, I. et al. 2000. The climate of North America and adjacent ocean waters ca. 6ka. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 37, 661-681.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) 2001. *Troisième rapport d'évaluation. GT I. Bilan 2001 des changements climatiques: Les éléments scientifiques*. J.T. Houghton et al. (Eds). 881pp. Cambridge University Press.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) 2001. *Troisième rapport d'évaluation. GTII. Bilan 2001 des changements climatiques: Conséquences, adaptation et vulnérabilité*. J.J. McCarthy et al. (Eds.). 1032pp. Cambridge University Press.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) 2001. *Troisième rapport d'évaluation. Rapport de synthèse*, R.T. Watson et al. (Eds.). 397pp. Cambridge University Press.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) 2000. *Rapport spécial du GIEC Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie*. R.T. Watson et al (Eds). 377pp. Cambridge University Press.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) 2000. Rapport spécial du GIEC : Scénarios d'émissions. *N. Nakicenovic et al. (Eds) 599pp. Cambridge University Press.*

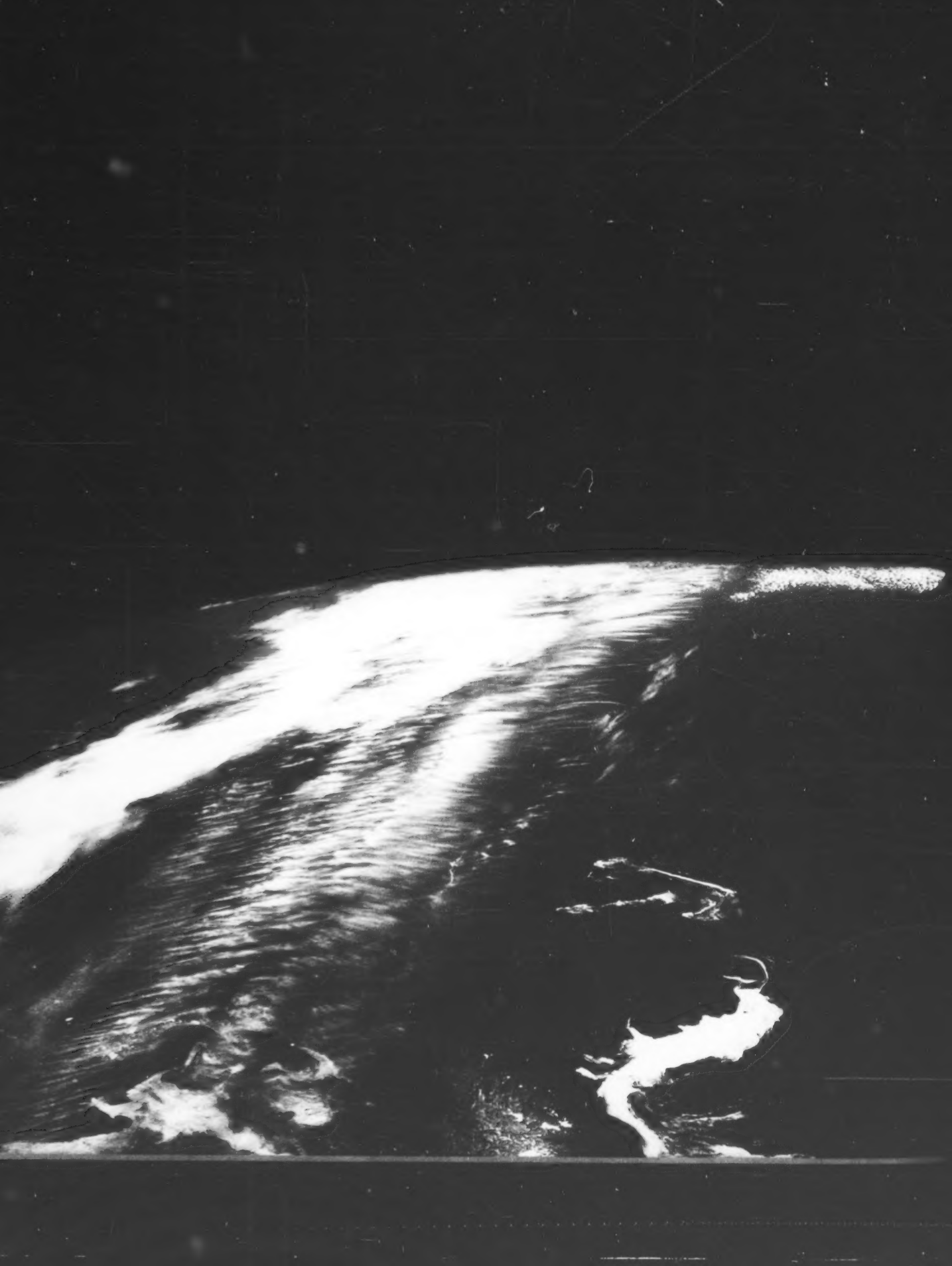
GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) 1995. *Deuxième rapport d'évaluation. GTI. Bilan 2001 des changements climatiques: Les éléments scientifiques*. J.T. Houghton et al. (Eds). 572pp. Cambridge University Press.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) 1995. *Deuxième rapport d'évaluation. GTII. Bilan 2001 des changements climatiques: Conséquences, adaptation et mitigation*. R.T. Watson et al. (Eds.). 872pp. Cambridge University Press.

Kharin, V. V. et Zwiers, F. 2000. Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM. *J. Climate* 13: 3760-3788.

Kiehl et Trenberth, 1997. Earth's annual global mean energy budget. Bull. American Meteorological Society 78:197-208.

Moberg, A., D.M. Sonechkin, K. Holmgren, N.M. Datsenko, et W. Karlen, 2005. High variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433, 613-617.

Zhang, X., L.A. Vincent, W.D. Hogg, and A. Niitsso. 2000. Tendances au Canada concernant la température et précipitation durant le vingtième siècle. *Océan atmosphérique*, Vol. 38(3): 395-429. (Version actualisée 2005).

Notes